



HAL
open science

Intégration du processus du remanufacturing en une PME commerciale : Proposition d'outils adaptés aux défis de cette transition vers l'Economie circulaire

Yahya Lahrour

► To cite this version:

Yahya Lahrour. Intégration du processus du remanufacturing en une PME commerciale : Proposition d'outils adaptés aux défis de cette transition vers l'Economie circulaire. Gestion et management. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2021. Français. NNT : 2021GRALI020 . tel-03233601

HAL Id: tel-03233601

<https://theses.hal.science/tel-03233601v1>

Submitted on 25 May 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Génie Industriel**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Yahya LAHROUR

Thèse dirigée par **Daniel BRISSAUD**

préparée au sein du **Laboratoire G-SCOP**
dans l'**École Doctorale I-MEP²**

Intégration du processus du Remanufacturing en une PME Commerciale : Proposition d'Outils adaptés aux défis de cette Transition vers l'Economie Circulaire.

Thèse soutenue publiquement le **25 février 2021**,
devant le jury composé de :

Mme Peggy ZWOLINSKI

Professeure, Grenoble INP, Université Grenoble Alpes (Présidente).

Mme Tatiana REYES CARILLO

MCF HDR, Université de Technologie de Troyes (Rapporteure).

M. Emmanuel CAILLAUD

Professeur, Université de Strasbourg (Rapporteur).

M. Nicolas PERRY

Professeur, ENSAM - Campus de Bordeaux-Talence (Examineur).

M. Daniel BRISSAUD

Professeur, Grenoble INP, Université Grenoble Alpes (Directeur de thèse).



Remerciements

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements à mon directeur de thèse Daniel Brissaud. Je le remercie pour la confiance qui m'a accordé en m'engageant dans cette expérience de thèse riche humainement et intellectuellement et pour les échanges qu'on a eu et son suivi de ce travail de thèse.

Merci également aux membres du jury, pour les retours enrichissants apportés à ce travail de thèse, Peggy Zwolinski, Tatiana Reyes, Emmanuel Caillaud et Emmanuel Caillaud.

Je remercie Fabrice Pasquer et tous les membres de l'entreprise Aqua-assainissement pour leurs collaborations fructueuses durant le projet RE-UT, grâce auquel on a pu accomplir de belles choses au sein de l'entreprise et emporter le trophée Eco-innovez 2018.

Mes remerciements vont également à mes collègues enseignants de l'école génie industriel de Grenoble INP pendant mes périodes de vacation durant mes années de thèse et puis en tant qu'ATER.

Je remercie tout le corps administratif du laboratoire G-scop, ainsi que le corps administratif de l'école GI de Grenoble INP.

Une chaleureuse pensée aux amitiés créées durant ces années de thèse avec : Hezam, Juliana, Lucas, Tomek, Yohannes, Tom.

Un profond remerciement à mon cher père, à ma chère mère, à ma chère fratrie, Marouane et Bilal, à toute la famille LAHROUR et MHANI d'avoir contribué pleinement à ce que je suis maintenant.

Résumé de la recherche

Le remanufacturing est considéré comme l'une des stratégies de fin de vie les plus efficaces et efficaces de l'économie circulaire, en termes d'avantages environnementaux et de viabilité économique. En absence d'initiatives par le Fabricant d'équipement d'origine (FEO) pour le Remanufacturing des produits, les vendeurs indépendants peuvent être des acteurs incontournables dans l'implémentation décentralisée des processus de Remanufacturing. En effet, grâce à la proximité géographique des vendeurs locaux, ils gardent un contact direct avec les utilisateurs ce qui leur permet de récupérer plus facilement les produits utilisés ou en fin de vie. Cependant, ces vendeurs ne détiennent ni le savoir-faire des activités en amont à la vente ni les connaissances techniques sur le produit et le processus pour développer le Remanufacturing. Pour répondre à ces verrous scientifiques d'ordres techniques, environnementaux et économiques, nous avons opté pour une méthodologie recherche-action centrée sur un cas d'étude d'une entreprise commerciale. Cette thèse explique les motivations et les barrières de la mise en œuvre du processus de Remanufacturing dans une petite entreprise commerciale et propose des méthodes adaptées au niveau de décision opérationnelle, pour relever les défis inhérents à la transition de ce type d'entreprises vers l'économie circulaire. Les méthodes proposées de cette thèse sont démontrées et appliquées sur le cas d'étude d'une entreprise commerciale qui intègre le Remanufacturing à son activité.

Ce travail de thèse s'articule principalement autour de quatre contributions :

- Identification des caractéristiques pertinentes des types de Remanufacturers ainsi que les motivations et les barrières d'implémentation du Remanufacturing pour les Remanufacturers indépendants ;
- Conception d'une méthode d'inspection de la remanufacturabilité du produit au niveau de décisions opérationnelles à partir des symptômes en adaptant l'Analyse des modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité ;

- Démarche de re-conception des composants en fin de vie pour la fabrication additive en processus de Remanufacturing, pour la capacité de ce procédé à absorber la variabilité des défaillances en fin de vie, en se focalisant sur les technologies de fabrication additive les plus adaptées aux caractéristiques du type de Remanufacturers indépendants;
- Analyse environnementale et économique des produits remanufacturés comparés aux produits neufs tenant compte de la large variabilité de l'état des produits en fin de vie.

Mots-clés : Remanufacturing - Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDEC)
- Fabrication Additive - Analyse de Cycle de Vie (ACV) - Economie Circulaire - Petites et Moyennes Entreprises (PMEs).

Abstract

Remanufacturing is considered as one of the most effective and efficient circularity strategies, in terms of environmental benefit and economic viability. In the absence of remanufacturing initiatives by the Original Equipment Manufacturer (OEM), independent sellers may be key players in a decentralized implementation of remanufacturing processes. In fact, local sellers have direct contact with product users due to their geographical proximity, which makes it easier for them to recuperate worn out and obsolete products. However, local sellers lack the technical know-how at the product and process level to implement remanufacturing activities. To meet the technical, environmental, and economic scientific issues, this PhD research opted for an action-research methodology based on a case study in a commercial company. This PhD thesis explores the motivations and barriers of implementing remanufacturing processes in small commercial companies. This research work proposes adapted methods at the operational level to address the inherent challenges of the transition from a linear towards circular economy model in Small and Medium Companies (SMEs). The proposed methods of this PhD thesis are demonstrated and applied on a case study at a commercial company that integrates remanufacturing to its activity.

This thesis work is mainly based on four contributions:

- Identification of the relevant characteristics of the types of Remanufacturers as well as the motivations and implementation barriers of remanufacturing for independent remanufacturers;
- Design of a method to inspect the remanufacturability of the product at the operational decision level from symptoms by adapting the Failure Mode, Effects, and Criticality analysis;
- Re-design of End of Life components for Additive Manufacturing in remanufacturing processes, for the ability of this process to absorb the variability of end-of-life failures, focusing on Additive Manufacturing technologies best suited to the characteristics of the independent Remanufacturers;
- Environmental and economic analysis of remanufactured products compared to new products taking into account the wide variability of the end-of-life condition of products.

Keywords: Remanufacturing - Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) - Additive Manufacturing - Lifecycle Assessment (LCA) - Circular Economy - Small and Medium Companies (SMEs).

Chapitre 1. TABLE DES MATIERES

| | |
|--|-----------|
| Remerciements | 3 |
| Résumé de la recherche | 4 |
| Abstract | 6 |
| Table des figures | 11 |
| Table des tableaux | 13 |
| Glossaire | 14 |
| Introduction générale | 16 |
| Chapitre 1. Etat de l’art de l’intégration de la stratégie de Remanufacturing dans les entreprises commerciales non-manufacturières | 19 |
| 1.1 Introduction | 20 |
| 1.2 La réponse industrielle à la crise écologique : De l’écologie industrielle à l’économie circulaire..... | 21 |
| 1.2.1 Les sources de l’économie circulaire | 21 |
| 1.2.2 Economie circulaire est-elle un recyclage de l’écologie industrielle ? | 23 |
| 1.2.3 Les stratégies de circularité de l’économie circulaire. | 23 |
| 1.2.4 Apport financier de l’économie circulaire : Est-elle un catalyseur de l’économie ? | 25 |
| 1.2.5 Apport environnemental de l’économie circulaire : résout-elle la crise écologique ?..... | 26 |
| 1.3 Les facteurs d’accélération de la transition écologique des entreprises..... | 28 |
| 1.3.1 La place de l’économie circulaire dans le tissu économique français..... | 28 |
| 1.3.2 Les types des entreprises de remanufacturing..... | 29 |
| 1.3.3 Les catalyseurs et les inhibiteurs de l’adoption du remanufacturing | 31 |
| 1.4 Etat de l’art des travaux relatifs à la faisabilité du remanufacturing :..... | 37 |
| 1.4.1 Outils d’aide à la décision pour le remanufacturing et niveaux de décision : | 37 |
| 1.5 Conclusion..... | 42 |
| Chapitre 2. Questions de recherche et la démarche de recherche | 43 |
| 2.1 Objectif de ce travail | 44 |
| 2.2 Unicité-exploration de la recherche | 44 |
| 2.3 Cas d’étude : L’entreprise Aqua-assainissement et le projet RE-UT..... | 45 |
| 2.4 Méthodologie de recherche | 46 |
| 2.4.1 Définition de la question de recherche :..... | 46 |
| 2.4.2 Validation et activation des savoirs :..... | 47 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 2.5 | Les verrous scientifiques de l'intégration du processus du remanufacturing par les entreprises commerciales :..... | 48 |
| 2.5.1 | La nécessité d'outiller les entreprises commerciales pour l'implémentation du remanufacturing : | 48 |
| 2.5.2 | Verrou 1 : Le diagnostic de produits en fin de vie le plus en amont du processus du remanufacturing. | 48 |
| 2.5.3 | Verrou 2 : La re-conception des composants pour la fabrication additive en remanufacturing. | 49 |
| 2.5.4 | Verrou 3 : Les bénéfices environnementaux et économiques face à la variabilité de l'état des produits à remanufacturer. | 50 |
| 2.6 | Conclusion..... | 51 |
| Chapitre 3. Le diagnostic de produits en fin de vie le plus en amont du processus du Remanufacturing..... | | 53 |
| 3.1 | Introduction | 54 |
| 3.2 | L'AMDEC, de la production au remanufacturing | 54 |
| 3.2.1 | Déroulement de l'AMDEC | 55 |
| 3.2.2 | De l'importance du Diagnostic en remanufacturing | 56 |
| 3.2.3 | L'AMDEC en remanufacturing | 56 |
| 3.3 | AMDEC un outil pour le diagnostic des produits à remanufacturer..... | 57 |
| 3.3.1 | Etapas de l'AMDEC pour le remanufacturing..... | 58 |
| 3.4 | Cas d'étude : Compresseur HP80..... | 63 |
| 3.4.1 | Description du produit et analyse des composants..... | 64 |
| 3.4.2 | Analyse des modes de défaillances potentiels..... | 66 |
| 3.4.3 | Identification des symptômes possibles | 68 |
| 3.4.4 | Calcul de l'indice de priorité des risques | 68 |
| 3.4.5 | La grille de diagnostic | 69 |
| 3.5 | Conclusion..... | 70 |
| Chapitre 4. La re-conception des composants pour la fabrication additive en remanufacturing..... | | 71 |
| 4.1 | Introduction | 72 |
| 4.2 | La fabrication additive en remanufacturing | 72 |
| 4.3 | Les technologies de Fabrication Additive et économie circulaire | 73 |
| 4.3.1 | Fusion sur lit de poudre | 73 |
| 4.3.2 | Dépôt de matière sous énergie concentrée | 75 |
| 4.3.3 | Extrusion de matière : Le dépôt de fil fondu (FDM) | 76 |
| 4.3.4 | Conclusion..... | 77 |
| 4.4 | Démarche de l'usage de la fabrication additive en remanufacturing | 78 |
| 4.4.1 | Identification/Caractérisation des composants pour la F.A. en remanufacturing | 79 |

| | | |
|--------------------|--|------------|
| 4.4.2 | Redéfinition des exigences fonctionnelles du produit..... | 81 |
| 4.4.3 | Re-conception du composant pour F.A..... | 87 |
| 4.4.4 | Test et validation | 90 |
| 4.5 | Conclusion..... | 92 |
| Chapitre 5. | Les bénéfices environnementaux et économiques face à la variabilité de l'état des produits à remanufacturer | 93 |
| 5.1 | Introduction | 94 |
| 5.2 | Evaluation environnementale du remanufacturing | 94 |
| 5.2.1 | Analyse de cycle de vie | 94 |
| 5.2.2 | L'ACV du remanufacturing | 95 |
| 5.2.3 | Cas d'études dans la littérature d'ACV des produits remanufacturés :..... | 97 |
| 5.2.4 | Les recommandations pour l'ACV du remanufacturing : | 98 |
| 5.3 | Analyse de Cycle de Vie du compresseur HP80..... | 99 |
| 5.3.1 | Contexte | 99 |
| 5.3.2 | Méthodologie générale..... | 100 |
| 5.3.3 | Champs de l'étude..... | 101 |
| 5.3.4 | Inventaire des données des étapes de cycle de vie..... | 103 |
| 5.3.5 | Résultats de l'ACV..... | 105 |
| 5.3.6 | Retour sur les hypothèses de l'étude..... | 108 |
| 5.3.7 | Conclusion sur l'ACV du compresseur..... | 112 |
| 5.4 | Produit remanufacturé ou produit neuf, lequel choisir ?..... | 112 |
| 5.4.1 | Un profit vert optimal face à une probable cannibalisation des produits neufs par des produits remanufacturés..... | 112 |
| 5.4.2 | Déduction des coûts économiques et environnementaux à partir des symptômes..... | 116 |
| 5.5 | Conclusion..... | 118 |
| | Conclusion générale | 119 |
| | Bibliographie..... | 125 |
| | Annexes | 133 |

Table des figures

| | |
|--|-----|
| Figure 1 : Les dates d'épuisement des ressources au rythme actuel de la croissance (BP statistical review of world energy, 2010). | 20 |
| Figure 2 : Concept de l'économie circulaire. Adapté de (Joltreau and Sommerfeld, 2019). .. | 22 |
| Figure 4 : Les étapes du processus du remanufacturing. | 25 |
| Figure 5 : Les 7 piliers de l'économie circulaire. | 27 |
| Figure 6 : Types d'entreprises de remanufacturing. | 30 |
| Figure 7 : Produits principalement vendus par Aqua. De gauche à droite : Moteur électrique, compresseur, pompe. | 45 |
| Figure 8 : Questions de recherche, objectifs de recherche et les écarts de recherche. | 52 |
| Figure 9 : Synthèse de la méthode AMDEC pour les produits à remanufacturer. | 63 |
| Figure 10 : Diagramme IBD du compresseur HP80. | 66 |
| Figure 11 : Grille de diagnostic pour le compresseur HP80. | 70 |
| Figure 12 : (A gauche) Remanufacturing d'une aube de turbine par DED. (À droite) Remplacement d'une plaque de joug par DFF. | 77 |
| Figure 13 : Les étapes clés du cadre méthodologique de l'usage de la F.A métallique pour le remanufacturing (Rickli et al., 2014). | 78 |
| Figure 14 : Implications de la F.A dans le processus de remanufacturing. | 79 |
| Figure 15 : Les étapes où la fabrication additive intervient dans le processus du remanufacturing. | 80 |
| Figure 16 : Processus de re-conception d'un composant en FdV. | 82 |
| Figure 17 : Mouvement du kit aimant. | 83 |
| Figure 18 : (à gauche) Kit aimant en FdV. (à droite) Mesure de la planéité du kit aimant en FdV. | 83 |
| Figure 19 : (à gauche) position normale du kit aimant. (À droite) Contact du kita aimant avec le bord de l'électro-aimant. | 84 |
| Figure 20 : Les efforts appliqués sur le kit aimant. | 85 |
| Figure 21 : Effort d'amortissement. | 86 |
| Figure 22 :Prototype1. | 88 |
| Figure 23 :Prototype2. | 89 |
| Figure 24 : Zones de ruptures du prototype2. | 90 |
| Figure 25 : Prototype3. | 90 |
| Figure 26 : Prototype4. | 90 |
| Figure 27 : Impact du moment d'inertie sur la durée de fonctionnement. | 91 |
| Figure 28 : Les étapes de l'Analyse de Cycle de Vie 95 | 95 |
| Figure 29 : Cycle de vie du compresseur pour cinq usages. | 103 |
| Figure 30 : Cycle de vie du compresseur remanufacturé pour deux usages. | 103 |
| Figure 31 : Proportion d'impacts par étapes du cycle de vie du compresseur neuf. | 105 |
| Figure 32 : Comparaison des catégories d'impacts du compresseur neuf et remanufacturé. | 106 |
| Figure 33 : Gaz à effet de serre sur un seul cycle de vie pour le compresseur neuf et le remanufacturé. | 107 |
| Figure 34 : Impacts environnementaux du compresseur neuf et remanufacturé. | 108 |
| Figure 35 : Comparaison des catégories d'impacts du compresseur neuf et remanufacturé avec un taux de récupération de 50%. | 109 |
| Figure 36 : Comparaison des impacts environnementaux par rapport à un taux de récupération de 67% et de 50%. | 109 |
| Figure 37 : Le coût du remanufacturing sur les étapes clés du processus. | 113 |
| Figure 38 : Les coûts inclus dans le produit neuf et remanufacturé. | 114 |

Figure 39 : Intégration des résultats de l'ACV et CCV dans l'AMDEC pour remanufacturing
..... 117

Table des tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau 1: Exemples de produits remanufacturés à succès. Adapté de (Institut de l'économie circulaire, 2016)..... | 29 |
| Tableau 2: Principales caractéristiques des entreprises de remanufacturing au moment de l'implémentation. | 35 |
| Tableau 3 : Description générale du produit..... | 64 |
| Tableau 4: Classification fonctionnelle des sous-ensembles du compresseur d'air HP80..... | 65 |
| Tableau 5 : Rapport des modes de défaillances. | 67 |
| Tableau 6 : Symptômes du compresseur HP80. | 68 |
| Tableau 7 : Calcul des Indices de Priorité du Risque | 69 |
| Tableau 8: Caractéristiques des produits remanufacturables par F.A..... | 81 |
| Tableau 9 : Mesures de planéité de deux aimants en FdV..... | 84 |
| Tableau 10 : Paramètres clés du prototype1. | 88 |
| Tableau 11: Paramètres clés du prototype2. | 89 |
| Tableau 12 : Paramètres clés du prototype3. | 90 |
| Tableau 13 : Paramètres clés du prototype4. | 90 |
| Tableau 14 : Données par rapport à chaque étape de cycle de vie du produit neuf..... | 104 |
| Tableau 15 : Données par rapport à chaque étape de cycle de vie du produit remanufacturé. | 104 |
| Tableau 16 : Etapes de cycle de vie du produit neuf déterminantes dans la comparaison entre produit neuf et remanufacturé. | 110 |
| Tableau 17 : Etapes de cycle de vie du produit remanufacturé déterminantes dans la comparaison entre produit neuf et remanufacturé..... | 111 |
| Tableau 18 : Application de l'outil Go/No-Go sur les produits d'Aqua..... | 115 |
| Tableau 19 : Résultat de des coûts environnementaux et économiques à partir d'un symptôme. | 117 |

Glossaire

| | |
|--------------|--|
| ABS | Acrylonitrile Butadiène Styène |
| ACV | Analyse de Cycle de Vie |
| Ademe | Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie |
| AFNOR | Association Française de Normalisation |
| AMDEC | Analyse des Modes de Défaillances de leurs Effets et de leur Criticité |
| PBT | Polytéraphthalate de butylène |
| CDP | Carbon Disclosure Project |
| DED | Direct Energy Deposition – Dépôt de matière sous énergie concentrée |
| EBM | Electron Beam Manufacturing |
| EC | Economie Circulaire |
| FA | Fabrication Additive |
| FdV | Fin de Vie |
| FDM | Fused Deposition Modeling - dépôt de fil fondu |
| FEO | Fabricant d'Equipement d'Origine |
| FEO-R | Fabricants d'Equipement d'Origine-Remanufacturers |
| GIEC | Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat |
| HCC | Haut Conseil pour le climat |
| HDPE | polyéthylène haut densité |
| IBD | Diagramme de Bloc Interne |
| IPR | Indice de Priorité des Risques |
| INSEE | Institut national de la statistique et des études économiques |
| ISO | Organisation internationale de normalisation |
| OCDE | Organisation de Coopération et de Développement Economique |

| | |
|--------|--|
| ONU | Organisation des Nations Unies |
| PAH | Processus d'Analyse Hiérarchique |
| PBF | Powder bed Fusion - Fusion sur lit de poudre |
| PC | polycarbonate |
| PCB | Polychlorobiphényle |
| PME | Petites et Moyennes Entreprises |
| PIB | Produit Intérieur Brut |
| PLA | Acide Polyactique |
| REP | Responsabilité Elargie des Producteurs |
| TPE | Très Petites Entreprises |
| US EPA | Agence américaine de protection de l'environnement |

Introduction générale

A présent l'activité humaine entraîne des dommages irréversibles sur la planète terre. Le rapport du **Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC)** annonce que le réchauffement planétaire a déjà atteint 1 °C au-dessus des niveaux préindustriels et qu'il atteindra probablement 1.5°C en 2030 (GIEC, 2019). La croissance de la population mondiale engendre la nécessité de satisfaire des besoins matériels grandissant, mettant une pression sur les ressources naturelles et une forte pollution suite aux transformations de ces dernières. L'urgence de la situation écologique impose une redéfinition de l'organisation industrielle et une proposition de nouveaux moyens de production plus soutenables. La circularité de l'économie est une réponse industrielle à la situation écologique actuelle. Toutefois, la transition de l'économie linéaire à l'économie circulaire doit faire face aux choix économiques adoptés antérieurement dans un contexte de globalisation de l'économie. L'intensité de la concurrence mondiale a poussé les entreprises à être dans une démarche continue de recherche du moindre coût pour la réalisation des produits. La délocalisation des usines de production était une solution rentable pour les entreprises européennes en quête de la main d'œuvre la moins chère. La délocalisation des moyens de production loin des utilisateurs européens a favorisé le transport des biens. Alors, les produits circulent d'une région à une autre parcourant des milliers de kilomètres et passant par plusieurs intermédiaires du producteur à l'utilisateur final. Ainsi, une fois les produits utilisés, finissent loin des sites de production pour un possible Remanufacturing par le producteur original. Cet éloignement entre l'endroit d'utilisation et l'endroit de fabrication rend davantage compliqué la possibilité de re-circularité de ces produits en fin de vie.

Le tiers des produits consommés en France sont importés (INSEE, 2017). Le Haut Conseil pour le Climat a montré qu'entre 1995 et 2018, les émissions de Gaz à Effet de serre importées ont augmentées de plus de 78% alourdissant le bilan carbone de la France. Ces émissions représentent actuellement la moitié des émissions du pays (HCC, 2020). Une fois le produit utilisé, il est jeté ou au meilleur des cas recyclé en fonction des dispositifs de traitements en fin de vie mis en place localement. Les produits en fin de vie sont traités à partir des législations mises en vigueur à l'endroit d'utilisation. Les réglementations européennes de Responsabilité Elargie des Producteurs (REP) obligent les fabricants de reconnaître et d'assumer les impacts environnementaux de leurs produits le long de leurs cycles de vie, tout en incluant la gestion des déchets ou la récupération des produits en fin de vie. La REP obligent les producteurs et les importateurs de prendre en charge financièrement la gestion de fin de vie de leurs produits. La gestion des déchets en fin de vie est perçue par les entreprises comme une charge financière supplémentaire qui réduit leurs bénéfices. Ajoutant à ceci, que contrairement à la circulation globalisée des produits, ces réglementations ne sont pas globalisées sur toutes les filières de production ni sur toutes les régions du globe. Le Remanufacturing en tant que stratégie d'économie circulaire, vient permettre aux entreprises de réduire les impacts environnementaux de leurs produits tout en créant des bénéfices économiques. Le Remanufacturing se définit en tant que processus industriel qui ramène un produit utilisé à au moins sa performance originale avec une garantie équivalente au produit neuf (King et al., 2006). La complexité de la logistique inverse, de l'utilisateur au centre de production, due à la présence de plusieurs acteurs intermédiaires, crée une barrière pour l'implémentation du Remanufacturing par les producteurs originaux. En outre, la disparité géographique entre producteur et utilisateur rend le Remanufacturing aux centres de production plus impactant d'un point de vue environnemental (Matsumoto et al., 2016).

Dans ce contexte, les producteurs originaux quittent le marché du Remanufacturing et ne saisissent pas la valeur économique et environnemental potentiel que peut offrir le Remanufacturing. Les utilisateurs jettent les produits après utilisation et ces derniers se trouvent au meilleur des cas au centre de recyclage sans que les entreprises bénéficient de la valeur ajoutée intrinsèque à ces produits. Cependant, les vendeurs locaux, après importation des produits, ont l'avantage d'être géographiquement proche et en contact direct avec les utilisateurs. Ces avantages facilitent, pour ce type, d'entreprise d'échanger les informations, avec les utilisateurs, sur l'usage du produit, les difficultés d'utilisation, les pièces détachées nécessaires pour la phase d'utilisation et éventuellement la possibilité de récupérer les produits en fin de vie. Toutefois,

ces entreprises ne disposent pas des connaissances manufacturières nécessaires pour l'implémentation du processus du Remanufacturing ni des connaissances relatives aux produits, en ce qui concerne, sa conception, sa fabrication et son fonctionnement.

Ainsi, nous nous intéressons dans ce travail de thèse à la transformation des entreprises commerciales en entreprises de Remanufacturing et ce que peuvent offrir potentiellement ces entreprises pour la transition écologique de l'industrie. Nous nous intéressons également à l'analyse de l'intégration du processus de Remanufacturing par ce type d'entreprise, entreprise commerciale et non-manufacturière, et de proposer des outils adaptés pour relever les difficultés inhérentes à ce type d'entreprise et à cette transformation.

Chapitre 1. Etat de l'art de l'intégration de la stratégie de Remanufacturing dans les entreprises commerciales non-manufacturières.

1.1 Introduction

L'intérêt des entreprises pour le remanufacturing a commencé dès la grande dépression et la période après-guerre. Une période marquée par une rareté des matériaux vierges. Les entreprises, se sont orientées vers le remanufacturing comme une stratégie leurs permettant de trouver des substituts aux matériaux vierges indisponibles en cette période (Seitz, 2007). L'intérêt du remanufacturing par les entreprises a commencé bien avant les premières inquiétudes relatives aux impacts écologiques de l'activité économique sur la planète terre. Ces inquiétudes exprimées, pour la première fois, dans le rapport « les limites à la croissance » du club de Rome (Meadows et al., 1972a), sur les limites de la croissance économique infinie dans un monde fini, avec d'un côté, des ressources limitées et, d'un autre côté, une évolution démographique permanente. La Figure 1 nous montre jusqu'à quand les ressources dureront au même niveau de croissance actuelle. Le remanufacturing aujourd'hui est approuvé comme une des stratégies de Fin de Vie (FdV) d'économie circulaire avec le moins d'impact environnemental. La boucle fermée du remanufacturing a regagné de l'intérêt ces dernières décennies par les entreprises voulant alléger leurs impacts environnementaux. Toutefois, les facteurs qui incitent les entreprises à créer une activité de remanufacturing ne dépendent pas uniquement d'une volonté de produire vert par ces entreprises mais plutôt d'autres facteurs tenant du contexte économique et des moyens technologiques (Bansal and Roth, 2000).

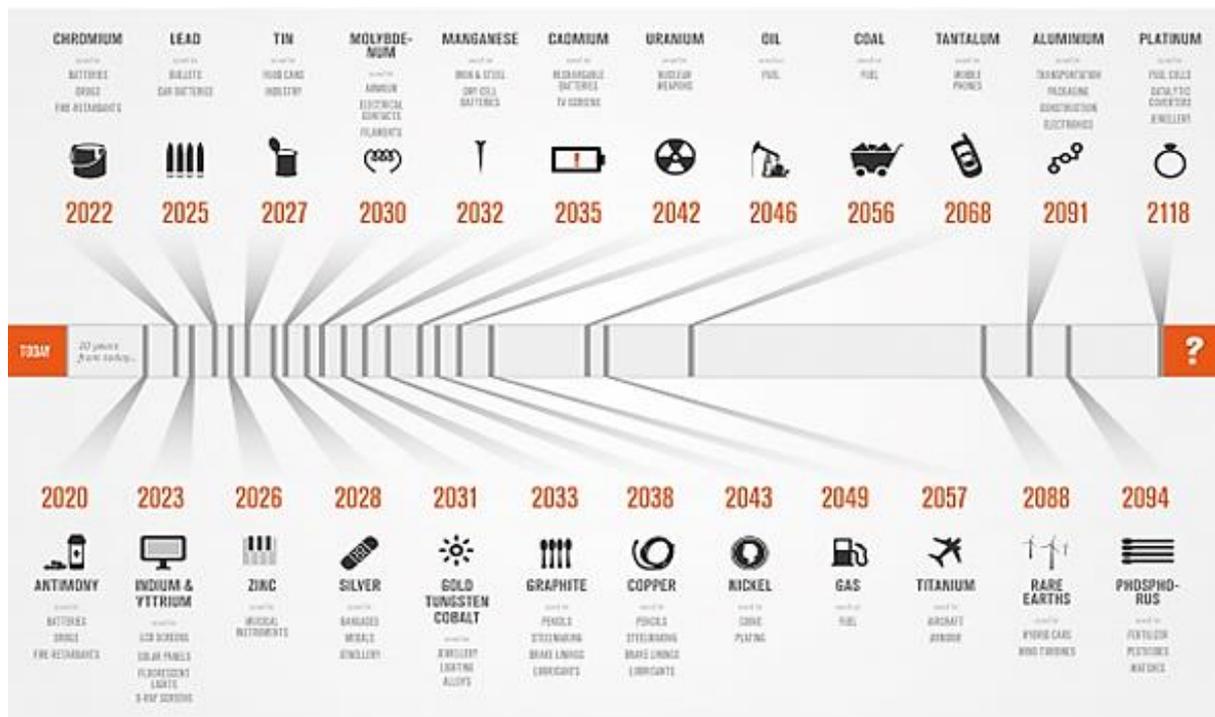


Figure 1 : Les dates d'épuisement des ressources au rythme actuel de la croissance (BP statistical review of world energy, 2010).

1.2 La réponse industrielle à la crise écologique : De l'écologie industrielle à l'économie circulaire

1.2.1 Les sources de l'économie circulaire

L'économie circulaire définie par la fondation Ellen Mac Arthur, se veut une économie restaurative et régénérative des biens environnementaux (Ellen Macarthur, 2016a). L'économie circulaire puise ses origines de plusieurs anciennes études prônant les bienfaits de la circularité de l'économie. On trouve les premières traces de la notion de circularité d'économie dans les travaux de (Boulding, 1966), il recommande un système économique fermé sans échange de matière avec la nature, dans lequel, la matière circule indéfiniment et d'une façon hermétique au sein de ce système. Selon l'auteur, la circularité de l'économie serait une condition nécessaire pour maintenir la soutenabilité et la durabilité de l'activité économique. Plus tard, en se basant sur les travaux de (Boulding, 1966), (Turner and Pearce, 1990) mentionnent pour la première fois le terme **économie circulaire** pour décrire l'interconnexion entre économie et environnement, jusque-là, les deux systèmes étaient théorisés comme systèmes indépendants. Plus tard, en s'appuyant sur les lois de la thermodynamique, (Turner and Pearce, 1990) ont conceptualisé le passage d'un système économique ouvert et linéaire à un système économique fermé et circulaire. Dans ce nouveau cadre théorique, l'environnement assure trois fonctions : un fournisseur de ressources, un assimilateur de déchets et une source d'utilité esthétique et spirituelle. Pour préserver l'environnement, l'interaction entre ce dernier et l'économie se fait de sorte à permettre la régénération des ressources premières, la restauration des produits après consommation, par les stratégies de fin de vie, et le rejet des matières non-recyclables par des faibles quantités permettant à la terre leurs assimilations. Ces fonctions sont d'ordre économique, parce qu'ils auront des valeurs positives s'ils étaient des services marchandables. D'après (Turner and Pearce, 1990), les dégradations environnementales étaient dues, d'une grande part au fait que ces fonctions de l'environnement échappées à toute évaluation monétaire. Plus tard, plusieurs réglementations de responsabilisation des entreprises aux dégâts environnementaux commis, comme le principe pollueur-payeur, ont été mises en place pour assurer une conservation des ressources et moins de rejet de substances nuisibles à l'environnement (Stevens, 1994).

Toujours dans la volonté de découpler la croissance et le prélèvement des ressources naturelles, suite aux alertes lancées par les scientifiques et les économistes depuis « halte à la croissance », (Frosch and Gallopoulos, 1989) deux ingénieurs de General Motors, proposent la notion d'**écosystème industriel** comme une réponse des entreprises pour la réalisation des

objectifs du développement durable. (Frosch and Gallopoulos, 1989) étalent les grandes lignes de la notion d'écosystème industriel en étant un système intégré contrairement au système existant simpliste dont « chaque opération de transformation, indépendamment des autres, consomme des matières premières, fournit des produits que l'on veut et des déchets que l'on stocke » à l'image du système industriel linéaire actuel, mais sans fournir une définition standard de l'écologie industrielle. Depuis, la notion d'écologie industrielle s'est ouverte sur plusieurs interprétations, mettant la délimitation de son champ d'étude un travail complexe. Toutefois, l'**écologie industrielle** peut se définir comme une approche globale et intégrée des composants du système industriel en relation avec la biosphère. Ces échanges sont quantifiés sous la forme des éléments biophysiques (masse, énergie, information) (Koenig and Cantlon, 1999). On peut citer comme exemple la symbiose industrielle de Kalundborg (Jacobsen, 2006). L'écologie industrielle a pour terrain d'étude les flux et les stocks de matière, d'énergie et d'informations relatifs à l'activité humaine. Ceci, afin de contribuer à la préservation de l'environnement, notamment par la valorisation des déchets en leurs attribuant une valeur économique, par le bouclage des cycles en minimisant les rejets, par la dématérialisation des produits en augmentant la productivité des ressources (avec peu on fait plus) et par la décarbonisation de l'économie grâce à l'efficacité énergétique, à l'abandon des énergies fossiles et à l'adoption de l'économie de fonctionnalité (Erkman, 2004). La Figure 2 représente le principe de l'économie circulaire.

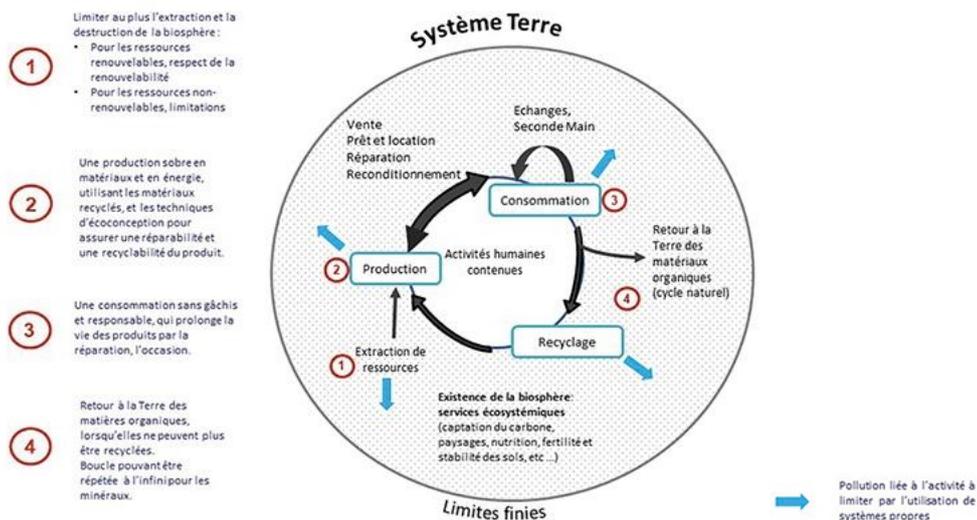


Figure 2 : Concept de l'économie circulaire. Adapté de (Joltreau and Sommerfeld, 2019).

1.2.2 Economie circulaire est-elle un recyclage de l'écologie industrielle ?

Les deux notions d'économie circulaire et d'écologie industrielle semblent très similaires, en premier, par la finalité de chacune des notions qui réside dans l'atteinte des objectifs du développement durable, et en deuxième, par la proposition de conception d'un système économique le plus fermé possible à l'environnement. Plusieurs scientifiques comme (Erkman, 2004), considèrent que l'écologie industrielle n'est qu'un outil parmi d'autres de mise en place de l'économie circulaire. Toutefois, ces deux notions présentent des différences majeures, au niveau du développement historique de chaque notion et du cadre institutionnel d'élaboration de chacun des concepts. On trouve que l'écologie industrielle était développée par la recherche académique, par contre, l'économie circulaire par le partenariat public-privé (Lefèvre, 2004), un deuxième point de divergence entre les deux concepts réside au niveau du positionnement théorique de chacune des notions. L'EI comprend des contributions dans les deux courants de durabilité, la durabilité faible (substitution entre les stocks de capitaux, économiques, environnementaux et sociaux) et la durabilité forte (aucune diminution des stocks de capitaux). Quant aux travaux de l'EC, ils s'orientent majoritairement vers la durabilité faible où la croissance économique est le moteur fondamental de l'achèvement de la durabilité et où les actions environnementales des entreprises sont vues comme des opportunités d'amélioration de la compétitivité des entreprises vers plus de croissance économique (Allenby, 1992).

Par le fait que l'économie circulaire s'inscrit dans une logique de durabilité faible, cette dernière est fondée sur le principe de forte substituabilité entre le capital environnemental, humain et financier grâce au progrès technologique. L'économie circulaire, par une vision Schumpéterienne de l'économie, cherche à surmonter les problématiques environnementales à partir de l'**innovation organisationnelle** et le **progrès technologique** (Figuière and Chebbi, 2016). A ceci, s'ajoute le modèle de croissance, qui reste dans le projet d'économie circulaire fondamental et porteur inéluctable des objectifs du développement durable (Nicklaus and Rouquet, 2014).

1.2.3 Les stratégies de circularité de l'économie circulaire.

Comme cité ci-dessus, l'économie circulaire permet d'améliorer l'efficacité des ressources en éliminant la notion de déchets et en permettant un écoulement circulaire et restauratif des ressources, contrairement au modèle linéaire actuel 'extraire-fabriquer-jeter' qui vise à consommer les matériaux et les énergies les moins chers et les plus accessibles (Despeisse et al., 2017). De cela, plusieurs stratégies ont émané permettant de garder et, par la suite de

recupérer, au plus haut niveau, la valeur du produit qui lui a été fourni durant la phase de fabrication initiale.

Il existe plusieurs stratégies de l'économie circulaire qui permettent de fermer la boucle (closing the loop) et de réduire les échanges entre le système économie et le système environnement. Toutes ces stratégies ont l'objectif de maintenir au mieux la valeur intrinsèque fournie au produit dès sa première fabrication. Le produit issu d'une de ces stratégies aura des caractéristiques et une durée de vie qui dépendra de la stratégie choisie. En comparant ces stratégies, d'un point de vue environnemental, on trouve que plus la boucle est petite plus elle est bénéfique pour l'environnement (King et al., 2006). De ceci, la réparation et le reconditionnement sont les meilleurs, puisqu'elles consomment moins d'énergie et de matériaux. Néanmoins, le remanufacturing permet d'obtenir des produits d'un degré de qualité plus important. Il s'agit d'une qualité similaire à celle des produits neufs. Par cela, le remanufacturing permet de fournir des produits plus appréciés pour les consommateurs. La Figure 3 représente le cycle de vie du produit et les stratégies de récupération en fin d'usage.

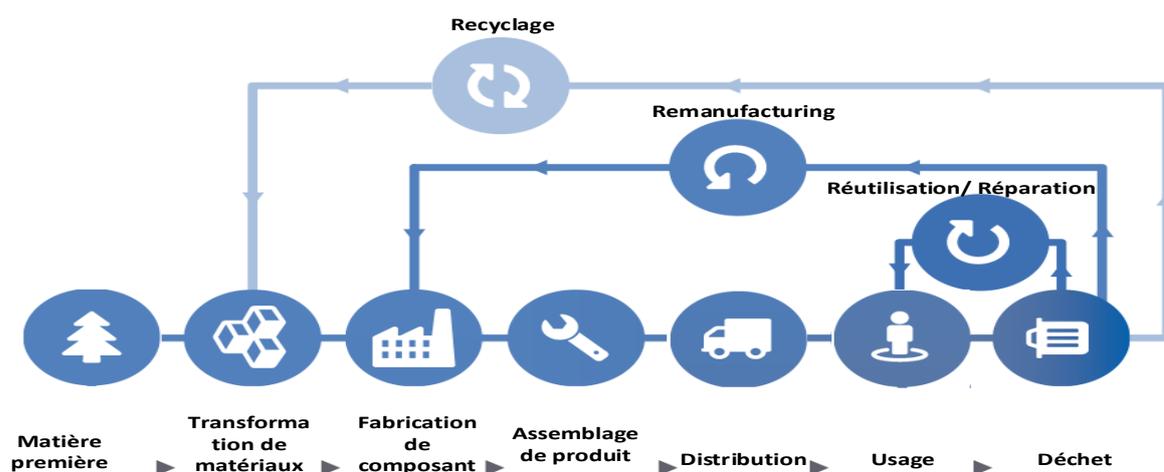


Figure 3 : Cycle de vie du produit et les stratégies de récupération en fin d'usage. (European Remanufacturing Network, 2015).

Ci-dessous, les définitions des trois principales boucles de la techno-sphère de l'économie circulaire.

Le **remanufacturing** est un processus industriel qui permet de restaurer un produit utilisé à un degré de performance « comme neuf ». Avec une garantie équivalente ou meilleure qu'un produit qui vient d'être manufacturé. Il inclut un ensemble de technologies, outils et connaissances, basés sur des méthodes afin de récupérer et réutiliser les fonctions et les

matériaux à partir des déchets industriels et des produits en FdV, sous une perspective de circularité de l'économie (Tolio et al., 2017).



Figure 4 : *Les étapes du processus du remanufacturing.*

Contrairement au processus de production, le processus de remanufacturing commence par l'inspection des produits retournés afin d'évaluer leur remanufacturabilité et se termine par l'inspection des produits en fin de processus pour vérifier leur équivalence de performances avec les produits neufs. Il s'agit principalement d'un processus manuel nécessitant une grande agilité des opérateurs. La Figure 4 nous montre les étapes du processus du remanufacturing.

Dans le processus du **Reconditionnement** le produit est retourné à des conditions satisfaisantes en remplaçant ou réparant les composants majeurs. Le niveau de performance du produit peut être « comme neuf » comme il peut être plus faible que celui d'un produit neuf, ce qui est le cas généralement.

La réparation est la correction des défauts spécifiques d'un produit. La qualité d'un produit réparé est inférieure aux produits remanufacturés ou reconditionnés (King et al., 2006). Cette solution reste un dernier recours pour récupérer la valeur initiale du produit avant de recourir, dans le cas échéant, à la valorisation du produit par le passage par la case matière grâce au **Recyclage**.

1.2.4 Apport financier de l'économie circulaire : Est-elle un catalyseur de l'économie ?

L'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE) a réalisé une étude bibliographique sur 24 modèles d'évaluation des conséquences macroéconomique de la transition d'une économie linéaire à une économie circulaire (*The Macroeconomics of the Circular Economy Transition*, 2018). Une des principales conclusions de cette revue de littérature est que tous les modèles étudiés confirment que la transition vers l'EC sera accompagnée d'une réduction de l'extraction des matériaux et de la génération des déchets, et 22 modèles sur 24 prédisent un impact positif de l'économie circulaire sur le plan macroéconomique tandis que les deux études restantes estiment un impact macro-économique insignifiant. La fondation Ellen Macarthur, en collaboration avec SUN et McKinsey, estiment que la transition vers une économie circulaire en Europe peut générer 900 milliards d'euros de

plus que l'économie linéaire. La croissance du Produit Intérieur Brut (PIB) serait atteinte essentiellement par la réduction des coûts de production grâce à la consommation efficace des intrants et par l'émergence de nouveaux marchés, générateurs de revenus, attribués aux activités de l'économie circulaire. Cette opportunité de réduction des coûts de matériaux est chiffrée à 630 milliards de dollars dans le cadre de l'économie circulaire. Notant également que la transformation de l'économie actuelle, incitera à la propulsion de nouvelles idées le long de la chaîne logistique, depuis la conception des produits soumis aux contraintes de circularité, la reconfiguration des systèmes de production et de reproduction, et en passant par la réorganisation de la logistique inverse. Cette transition propice à l'innovation, entraînerait une dynamique en économie qui favoriserait un taux de progrès technologique plus élevé, des matériaux plus performants, une meilleure rentabilité de la main-d'œuvre, une meilleure efficacité énergétique et des opportunités de profits plus nombreuses pour les entreprises. (Ellen Macarthur, 2016b). En revanche, dans une revue de littérature plus récente réalisée par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) sur les modèles d'analyse macroéconomique, cette étude estime qu'au vu de l'état des connaissances actuelles, rares sont les mesures qui favorisent le développement de l'économie circulaire qui peuvent être représentées explicitement dans les modèles macroéconomiques. Ces modèles existants évaluent, plutôt, les impacts économiques de la transition énergétique, par conséquent, il n'existe aucun modèle équivalent pour étudier les conséquences macroéconomiques de l'économie circulaire (ADEME, 2018).

1.2.5 Apport environnemental de l'économie circulaire : résout-elle la crise écologique ?

Les premières études portées sur les bénéfices environnementaux potentiels de l'économie circulaire, prédisent que le modèle circulaire permettrait de diviser à moitié les émissions de dioxyde de carbone d'ici 2030 en Europe (Ellen Macarthur et al., 2015). Dans la même étude il est estimé que la consommation des ressources primaires chutera pour la même année de 32% et de 53% en 2050. Cette étude était faite sur les ressources primaires utilisées dans l'industrie automobile et de construction, l'industrie des engrais artificiels, des terrains immobiliers, de l'utilisation de l'eau en agriculture, des pesticides, des carburants et de l'électricité non renouvelable. Il est à noter que (Ellen Macarthur et al., 2015) ne précise pas les choix méthodologiques qui ont abouti à ces résultats. D'autres avantages environnementaux sont mis en avant par la fondation Ellen Macarthur tels que : la réduction de la pollution de l'air et de l'eau et la pollution sonore, ainsi que la limitation de la libération de substances toxiques et le

changement climatique. Les études élaborées par les instituts porteurs de l'économie circulaire (par exemple : Fondation Ellen Macarthur) ne présentent pas une quantification détaillée sur plusieurs indicateurs des apports écologiques de l'économie circulaire. Mais ils assurent que ces apports s'obtiendront grâce au déploiement des sept piliers (Figure 5) sur lesquels repose l'EC (Figuière and Chebbi, 2016). Ces piliers qui ont démontré leurs efficacités pour la réduction des impacts environnementaux de l'activité industrielle.



Figure 5 : Les 7 piliers de l'économie circulaire.

Pour conclure, l'économie circulaire se présente comme un système économique permettant de découpler la croissance économique, d'une part, de la consommation des ressources primaires et d'une autre part des rejets industriels dans l'environnement. Cette transition est synonyme d'une reconfiguration des modes de production et une restructuration des liens et des rapports entre les constituants de l'ensemble du tissu économique.

En effet, l'économie circulaire reste encore à son jeune âge théorique et conceptuel. Elle se veut un concept fédérateur et englobant plusieurs démarches et stratégies antérieurement proposées pour réduire les impacts environnementaux de l'activité humaine. De ce fait, le concept d'économie circulaire connaît encore des limites environnementales, économiques et sociales qui nécessitent une multiplication des travaux pour débloquer le potentiel et l'intérêt qu'elle peut apporter à la durabilité du système économique. (Korhonen et al., 2018) a identifié six limites environnementales de l'économie circulaire : les contraintes thermodynamiques, les frontières spatio-temporelles des systèmes circulaires, les flux d'énergies et de matières, la gestion inter-organisationnelle et intra-sectorielle des stratégies d'économies circulaires ainsi que les effets rebonds et Boomerang dus à l'éco-efficience des systèmes circulaires.

1.3 Les facteurs d'accélération de la transition écologique des entreprises

1.3.1 La place de l'économie circulaire dans le tissu économique français

Le tissu économique français est composé majoritairement des très petites entreprises (TPE) ainsi que les petites et moyennes entreprises (PME) (environ 99,8% dont 96% des TPEs) (INSEE, 2018). Dans une enquête menée par l'observatoire FUSION auprès de 231 TPE/PME de Belgique, d'Angleterre et de France, dont 51 entreprises françaises, uniquement 9,2% entreprises déclarent comprendre le terme économie circulaire et envisage de mettre en œuvre des démarches dans ce sens (FUSION, 2014). Un pourcentage qui reste faible vu la grande proportion des TPE/PME dans le tissu économique français et vu les objectifs du développement durable, définis par l'Organisation des Nations Unies (ONU), atteignables en partie grâce au déploiement de l'économie circulaire (United Nations, 2015).

L'Atteinte de ces objectifs par l'EC exige la mobilisation du plus grand nombre de maillons constituant la chaîne économique. Notons, toutefois, que les entreprises les plus polluantes en France ne sont pas les TPE/PME et encore moins les entreprises commerciales mais plutôt les grandes entreprises spécifiquement dans le secteur de la chimie (CDP, 2017).

1.3.1.1 Les entreprises de remanufacturing en France

Après maintes recherches sur les entreprises qui exercent le remanufacturing en France, on a trouvé peu de données et aucune information issue d'une institution chargée de l'économie circulaire sur le nombre et le type de ces entreprises. Sur le site (remanufacturing.fr) qui recense et regroupe les acteurs du remanufacturing en France, on trouve une liste de 16 entreprises, toutes les entreprises qui y figurent sont des multinationales et on ne trouve aucune PME dans la liste. Certes il s'agit d'une liste non exhaustive, mais ceci révèle que le Remanufacturing est loin d'être une activité répandue chez les industriels et encore moins chez les entreprises commerciales. On observe également une non-représentativité des PME qui peut être expliquée également par une non-visibilité de ces entreprises et leurs pratiques relatives à l'économie circulaire et au remanufacturing plus spécifiquement. Une autre possibilité est que certaines entreprises peuvent faire du Remanufacturing mais sans l'identifier par ce terme-là.

1.3.1.2 Exemples de produits remanufacturés avec succès

(Institut de l'économie circulaire, 2016) affirme que seulement certains types de produits répondant à trois critères peuvent être remanufacturés : les produits remanufacturables ne

doivent pas être soumis à des évolutions technologiques ou réglementaires, doivent être faciles à remanufacturer, doivent être dés-assemblables et re-assemblables et avoir une valeur élevée. Le tableau 1 liste des exemples de produits remanufacturés avec succès :

Tableau 1: *Exemples de produits remanufacturés à succès. Adapté de (Institut de l'économie circulaire, 2016).*

| Secteur | Exemples de produits remanufacturés |
|-------------------------|---|
| Automobile | Alternateur, moteur, pompe à eau, boîte de vitesse, etc. |
| Equipement de chantier | Démarrateur, alternateur, frein, etc. |
| Aéronautique et défense | Moteur, train d'atterrissage, etc. |
| Equipement industriel | Turbine, Vanne, Compresseur, Machine-outil, etc. |
| Mobilier de bureau | Table, chaise, armoire, etc. |
| Equipement informatique | Imprimante, Scanner, photocopieur, cartouche d'imprimante |

1.3.2 Les types des entreprises de remanufacturing

Avant d'explicitier la méthodologie de notre recherche, nous mettrons le point dans cette partie sur les types de remanufacturers existant dans la littérature. Cela, afin de situer l'entreprise commerciale, objet de notre étude, par rapport aux types d'entreprises de remanufacturing existants. Puis, d'observer, d'un côté, les motivations qui incitent ce type d'entreprise à faire du remanufacturing et d'un autre côté, les barrières qui entravent son implémentation. La connaissance des motivations et des barrières est essentielle pour évaluer, à la fois, la faisabilité de l'accomplissement des attentes de l'entreprise et pour surmonter les barrières qui peuvent faire face à la mise en place du remanufacturing.

Dans la littérature consacrée à la classification des entreprises de remanufacturing, on trouve deux grandes familles de Remanufacturers : les **Fabricants d'Equipement d'Origine-Remanufacturers** (FEO-R) et les **Tiers Remanufacturers**. Ces derniers se divisent en deux catégories, les **Remanufacturers sous-traitants** (Sous-traitants-R) caractérisés principalement par une coordination directe et étroite avec le **Fabricant d'Equipement d'Origine** (FEO) et les **Remanufacturers Indépendants** (Indépendants-R) qui lancent cette activité de leurs

propres initiatives et généralement sans intervention ou coopération avec le (FEO). La Figure 6 synthétise les différents types de Remanufacturier.

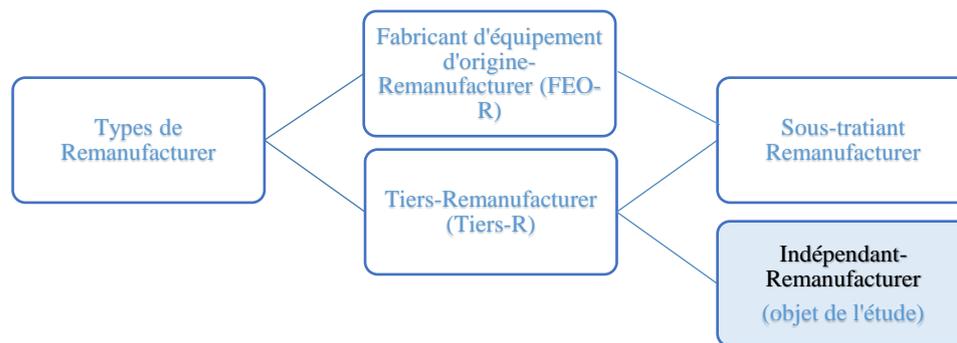


Figure 6 : *Types d'entreprises de remanufacturing.*

1.3.2.1 Les Fabricants d'Équipement d'Origine Remanufacturers (FEO-R)

FEO-R sont des entreprises qui remanufacturent les composants qui sont produits initialement par la même entreprise. Le FEO-R maîtrise le processus des produits initiaux de la conception à la commercialisation. En recevant, les produits retournés, l'entreprise les sélectionne, les nettoie et reproduit des nouveaux avec un niveau de qualité semblable aux produits initialement réalisés et conformes à leurs spécifications internes. L'activité du remanufacturing permet aux FEOs d'obtenir des bénéfices sur l'économie des matériaux, de l'énergie, du temps de travail, de la main d'œuvre et de la création de nouvelles opportunités de marché par le verdissement de leurs images (McConocha, D.M. and T.W. SPeh, 1991). Le principal avantage, de ce type de Remanufacturier, c'est que l'entreprise a déjà l'expertise relative à la chaîne de valeur du produit et une connaissance des standards et des exigences de production de leurs produits qui peuvent être transposés sur la chaîne du remanufacturing.

1.3.2.2 Tiers-Remanufacturier (Tiers-R)

Comme cité, il existe deux types de Tiers Remanufacturers, les sous-traitants-R et les indépendants-R. Les sous-traitants-R s'occupent uniquement du processus opérationnel du remanufacturing, les autres processus comme le marketing et la chaîne logistique inverse restent gérés par le FEO (Zou et al., 2016). Ce dernier travaille en étroite collaboration avec ce type de Remanufacturier et délivre toutes les informations sur le produit, il peut partager des secrets technologiques, il forme les travailleurs en remanufacturing à ses normes et il utilise son nom de marque (Matsumoto, M. et W. Ijomah, 2013). De l'autre côté, l'Indépendant-R récupère les produits en fin de vie directement chez les utilisateurs et procède à leur remise à neuf. Par le fait que l'indépendant-R lance l'activité de remanufacturing sans préalable coordination avec

le FEO, l'indépendant-R s'appuie sur les outils d'ingénierie inverse pour obtenir les connaissances liées au produit, des connaissances nécessaires pour les opérations du processus du remanufacturing. Généralement, les indépendants-R sont des petites entreprises qui travaillent localement et directement avec les utilisateurs de produits. La principale différence constatée sur les deux types des Tiers-Remanufacturers est le niveau d'implication du FEO dans le processus du remanufacturing. Ce paramètre s'avère important, grâce aux informations échangées, dans la facilitation de l'implémentation du remanufacturing. Nous pouvons déjà constater que le sous-traitant-R peut être une bonne option pour le remanufacturing (surtout en phase d'implémentation). On peut constater également que le sous-traitant-R n'est qu'un cas de figure de la collaboration entre FEO et indépendant-R.

1.3.3 Les catalyseurs et les inhibiteurs de l'adoption du remanufacturing

On distingue entre deux types de facteurs pour l'adoption du remanufacturing par les entreprises, d'une part les catalyseurs qui facilitent cette adoption et les inhibiteurs qui entravent cette dernière. Nous nous intéressons à ces facteurs afin de proposer une méthode d'implémentation du remanufacturing qui tient compte des éléments facilitateurs et des éléments inhibant l'adoption du remanufacturing. Dans cette partie, nous détaillerons, à partir de la littérature, les facteurs critiques qui influencent l'adoption du remanufacturing. Nous contextualiserons, plus tard, ces facteurs par rapport aux caractéristiques de l'entreprise objet de l'étude.

1.3.3.1 Les raisons des entreprises pour verdir leurs activités

Plusieurs études se sont intéressées à déterminer les raisons pour lesquelles les entreprises agissent pour répondre aux problématiques écologiques. Ces études ont décelé plusieurs raisons, comme la conformité réglementaire, l'avantage compétitif, la pression des parties-prenantes, des préoccupations éthiques et les initiatives venant des directions d'entreprises (Lampe et al., 1991). Dans l'étude réalisée par (Bansal and Roth, 2000), les auteurs se sont intéressés à la question de savoir pourquoi les entreprises se mettent au 'vert' ? Et ce, afin d'élaborer un modèle qui explique les raisons de la responsabilité écologique de ces entreprises. Ceci a été fait grâce à l'identification des motivations pour l'adoption des initiatives écologiques et les facteurs sous-jacents qui conduisent à chaque motivation. Dans cette étude, **la responsabilité écologique** des entreprises comprend toutes les initiatives servant à atténuer l'impact environnemental des entreprises. (Bansal and Roth, 2000) se sont basés sur un modèle préliminaire réunissant uniquement quatre facteurs qui agissent sur la responsabilité écologique

des entreprises. A partir des données du terrain et en adoptant une méthodologie d'induction analytique, ils ont mené des entretiens entre 1992 et 1995 avec 53 entreprises de différentes tailles, différents secteurs d'activité et plusieurs nationalités. Les données issues de ces entretiens ont révélé que les incitations des entreprises pour les modes de production écologiquement responsable sont autour de quatre : La **législation**, la **pression des parties-prenantes**, la **compétitivité** et les **valeurs éthiques**.

En premier, vient **la législation** comme un facteur qui a une très grande importance pour induire des actions écologiques chez les entreprises (Lampe et al., 1991). Les organismes institutionnels obligent les entreprises par le biais des sanctions à sévérité croissante, des amendes et des frais juridiques à se conformer à la législation et réduire les impacts environnementaux. **La pression des parties-prenantes** dont les clients, les institutions gouvernementales, les organisations non-gouvernementales ainsi que l'environnement lui-même (Berry and Rondinelli, 1998) ont une influence sur les décisions relatives à la régulation des impacts environnementaux. Les initiatives de réduction des impacts environnementaux des entreprises peuvent créer **des opportunités économiques** par l'efficacité de consommation des ressources en matière première et en énergie, par la différenciation commerciale que les produits verts peuvent apporter et par la création d'activités génératrices de bénéfices comme la vente de matériaux en fin de vie des produits ou même le remanufacturing de ces derniers. En dernier, arrivent **les valeurs éthiques de l'entreprise** définies en top management qui orientent les actions de l'entreprise et leurs interactions avec l'environnement.

(Carillo, 2007) a réalisé une étude menée auprès de 69 entreprises en France de tailles différentes, sur les motivations des entreprises et les barrières à contourner pour l'intégration de l'environnement dans la conception des produits. D'un côté, cette étude révèle que les principales motivations des entreprises pour mener des initiatives d'écoconception sont, en premier lieu, le respect de la réglementation puis vient l'image de marque puis la responsabilité environnementale, l'implication des dirigeants et la politique de l'entreprise. Les groupes de pression ne sont pas considérés comme une forte motivation par les industriels. De l'autre côté les barrières à contourner sont manque d'information, de retour d'expérience et d'exigence explicites de la part des clients

Notre objectif, dans cette partie, n'est pas d'observer les mécanismes et les contextes qui favorisent la responsabilité écologique des entreprises mais plutôt de comprendre, à partir de la littérature, quelles sont les motivations des entreprises pour produire avec moins d'impacts environnementaux. Dans l'étude de (Hart, 1995), **la compétitivité de l'entreprise** est l'un des facteurs majeurs de prises d'initiatives respectant l'environnement. Les entreprises étant

soucieuses de la rentabilité de leurs activités, elles jugent que les initiatives environnementales peuvent être source de profit, notamment, par la gestion efficace de l'énergie et des déchets. Ceci s'acquiert grâce à la rentabilité, l'intensification de la production où l'entreprise, par une gestion rationnelle des ressources, peut obtenir avec les mêmes intrants (matières premières) plus de sortants (produits finis). Les initiatives écologiques sont considérées par les entreprises comme une opportunité de verdissement de leurs images de marque et ils peuvent attirer une clientèle sensible aux produits écoresponsables. Le deuxième facteur de prises d'actions écologiques par les entreprises réside dans **la législation** et les normes environnementales appliquées. Contrairement aux autres facteurs, notamment l'incitation économique, la législation place les entreprises dans une position de réaction par les sanctions et les amendes appliquées en cas de non-conformité de leurs activités industrielles avec les lois en vigueur (Hart, 1997). Ainsi, le facteur législation pousse les décideurs des entreprises à agir afin de réduire et d'éviter les coûts et les risques potentiels suite à une infraction à la réglementation appliquée. Toutefois, sous forte pression concurrentielle et pour des raisons de rentabilité économique, les décideurs d'entreprises peuvent falsifier ou tromper les dispositifs de contrôles pour échapper aux amendes et continuer à profiter de plus grandes marges économiques tout en nuisant à l'environnement. Pour exemple, l'affaire Dupont, rejet des polluants toxiques en Virginie occidentale tout en niant pour plusieurs décennies leur nuisibilité (Andrews and Walker, 2015) et l'affaire « Dieselgate » dans laquelle Volkswagen fut reconnue coupable de l'utilisation de logiciels frauduleux développés intentionnellement pour réduire les émissions d'oxyde d'azote et du dioxyde de carbone au moment des tests d'homologation. Une fraude qui a permis la vente de 43 millions de véhicules, encore en circulation, aux émissions au moins trois fois supérieures aux normes européennes (US EPA, 2015). On peut citer également le cas de Monsanto qui a décidé de conclure des accords s'élevant à 820 millions de dollars pour dédommager plusieurs agriculteurs suite aux pollutions au Polychlorobiphényle (PCB). Par ces accords, Monsanto s'évite des jugements pénalisants par les tribunaux et la firme juge que ces accords sont financièrement raisonnables par rapport aux risques financiers qu'impliqueraient ces contentieux permanents sur l'image de l'entreprise (Bayer AG, 2020). Ceci dit, même en cas d'imputabilité, les amendes restent inférieures aux profits générés suite aux ventes réalisées durant la période de dissimulation. En troisième facteur, vient **le sens éthique** de l'entreprise où la responsabilité écologique émane des obligations sociales intrinsèques au système de valeurs défini par les décideurs de l'entreprise ou découlant de son histoire.

D'autres études, (Berry and Rondinelli, 1998), se rejoignent sur le fait que la pression des gouvernements, des consommateurs, des concurrents et de l'opinion publique entraînent les

entreprises à devenir écoresponsable. Toutefois, ces études affirment également que les entreprises qui adoptent des mesures environnementales proactives gagnent en efficacité et en compétitivité économique. En d'autres termes, les entreprises se motivent davantage et aspirent, par les initiatives écoresponsables, à créer de la valeur économique. La législation pousse les entreprises à se résigner et adopter les initiatives écoresponsables mais elle reste vue par plusieurs décideurs en industrie comme une contrainte face au développement économique de leurs entreprises. Pour conclure, nous estimons que de toutes les motivations détaillées ci-dessus, **la compétitivité de l'entreprise, la législation et le sens éthique**, la compétitivité de l'entreprise est la motivation la moins subjective, comparée au sens éthique qui dépend des valeurs qui émanent de l'entreprise et qui reste fortement variable d'une entreprise à une autre.

Une fois les conditions réunies pour permettre aux entreprises de créer du profit grâce aux activités respectueuses de l'environnement, les entreprises adhéreront d'elles-mêmes, d'une façon proactive, et adopteront ces activités. Par le caractère contraignant de la législation, les entreprises se résignent à respecter l'environnement mais des dérives volontaires peuvent être commises pour échapper à la réglementation environnementale.

1.3.3.2 Les catalyseurs et les inhibiteurs pour chaque type d'entreprise de remanufacturing

1.3.3.2.1 Catalyseurs du remanufacturing

Le remanufacturing est une activité industrielle marquée par une très grande et large incertitude venant du volume des produits retournés et leurs états de qualité (Matsumoto et al., 2016). De ce fait, les entreprises restent sceptiques face à la viabilité économique du remanufacturing, ce qui mène à un marché potentiel inexploité des produits en fin de vie (Rozenfeld and Barquet, 2013). Pourvu que le remanufacturing présente un gain économique et environnemental important, il doit surmonter plusieurs barrières technologique et législative. Les motivations pour son implémentation varient d'un type de Remanufacturer à un autre (FEO-R ou Tiers-R). Dans l'étude réalisée par (Seitz, 2007) et basée sur plusieurs cas d'études avec 130 interviews adressés à cinq entreprises de remanufacturing dans le secteur automobile, l'étude conclut que les motivations classiques comme, la peur de la législation, la rentabilité et les préoccupations morales et éthiques ont une faible influence sur la décision de remanufacturer ou non pour les FEOs. A cause des incertitudes de l'acquisition des produits retournés, de la logistique inverse hautement imprédictible et le coût de mains d'œuvre hautement cher, les FEOs considèrent, selon (Seitz, 2007), que le profit du produit remanufacturé est plus faible que celui du produit neuf. En revanche, la disponibilité des futures

pièces de rechange, l'augmentation de la part du marché et la protection du nom de la marque sont identifiés comme les motivations avec le plus d'influence sur les FEOs pour l'adoption du remanufacturing. Dans l'étude de (Wei et al., 2015), des motivations d'ordre similaires sont observées chez les FEOs comme l'obtention d'avantages stratégiques par la consolidation de la compétitivité de l'entreprise. Tableau 2 résume les similarités et les différences entre ces types de Remanufacturers.

Tableau 2: *Principales caractéristiques des entreprises de remanufacturing au moment de l'implémentation.*

| Type de Remanufacturier | | Niveau de connaissance du produit | Niveau de technologie | Chaîne logistique inverse | Marketing |
|-------------------------|-----------------|-----------------------------------|-------------------------|---|--|
| FEO-R | | élevé | élevé | Complexe pour les FEO en Offshore | Mise en avant du nom de la marque |
| Tiers-R | Sous-traitant-R | Transférable par le FEO | Transférable par le FEO | - | - |
| | Indépendant-R | Faible | Manque de technologie | Local, plus de facilité à récupérer les produits en FdU | Mise en avant des bénéfices environnementaux du remanufacturing. |

Les Tiers-R ont d'autres raisons pour démarrer le remanufacturing. La principale motivation de ce type de Remanufacturier est les bienfaits environnementaux des produits remanufacturés. Ces derniers caractérisés par des faibles émissions de CO2 et une utilisation moindre des matériaux vierges par rapport aux produits neufs (Saavedra et al., 2013). En fait, les Tiers-R exploitent cet avantage environnemental comme un argument de marketing pour verdir leur image. Une telle image est perçue par ces entreprises comme un moyen de pénétrer un nouveau marché destiné à une clientèle plus attentive aux impacts environnementaux des produits achetés. En ce qui concerne les incitations économiques, les tiers-R perçoivent le coût plus bas des produits remanufacturés comme un avantage compétitif pour fixer des prix plus bas que ceux des produits neufs.

En dépit de toutes ces incitations que le remanufacturing crée, il présente plusieurs barrières communes pour les deux grandes familles de Remanufacturers mais aussi des barrières inhérentes à chaque type.

1.3.3.2.2 Les inhibiteurs du remanufacturing

L'un des grands challenges du remanufacturing sont l'incertitude et la complexité. L'incertitude en remanufacturing vient de la variabilité du niveau de qualité des produits en fin de vie (Parker et al., 2015). D'un utilisateur à un autre, chaque produit est utilisé le long de sa durée de vie d'une façon particulière, chose qui entraîne une détérioration particulière d'un produit à un autre. Une deuxième incertitude vient de la complexité de la logistique inverse, puisque la quantité et le moment de retour des produits par l'utilisateur sont difficilement prévisibles. Nous pouvons ajouter la perception du consommateur au regard des produits remanufacturés comme une barrière pour les Remanufacturers. En effet, les consommateurs perçoivent les produits remanufacturés comme des produits contenant des composants déjà utilisés, du coup, rapidement défaillants. Cette perception est d'autant plus alimentée par les prix plus bas des produits remanufacturés, signe que ces derniers ont une plus faible qualité (Wei et al., 2015).

Pour les FEO-R, ils considèrent que le lancement des produits remanufacturés dans le marché présente une menace de cannibalisation des ventes de leurs produits neufs (Subramoniam et al., 2009). Une autre difficulté pour les FEO-R est que le processus du remanufacturing ne s'adapte pas facilement avec le processus de production et compliquent fortement les opérations existantes (Kapetanopoulou et Tagaras, 2011). De l'autre côté les Tiers-R font face à d'autres types de barrières. La plus importante difficulté est le manque de connaissance du produit et de leurs processus de fabrication, le faible niveau de technologie à disposition et en dernier les restrictions législatives concernant la protection des marques (Parker et al., 2015).

Comme montré dans les études ci-dessus, les principales motivations et barrières de l'implémentation du remanufacturing sont essentiellement d'ordre technique et économique. En deuxième lieu, viennent les difficultés législatives caractérisées par l'absence de normes en remanufacturing. Toutefois, les incitations et les barrières dépendent du type de Remanufacturer. Nous pouvons conclure que le remanufacturing présente pour le FEO-R une activité qui augmente la disponibilité des pièces de rechanges et surtout un moyen de faire barrage aux initiatives des Remanufacturers indépendants qui exploitent leurs produits en fin de vie. Toute indulgence, par le tiers-R, sur la qualité des produits remanufacturés conduira à la dégradation de l'image du FEO. Dans l'autre côté, les tiers-R sont intéressés par l'impact environnemental réduit des produits remanufacturés qui permettra de verdir leurs images et à les placer dans un nouveau marché de niche. Néanmoins, le manque de connaissance du produit

à remanufacturer et des technologies à intégrer dans le processus de remanufacturing crée une grande difficulté pour les tiers-R.

1.4 Etat de l'art des travaux relatifs à la faisabilité du remanufacturing :

Dans cette partie, nous examinerons les travaux académiques sur les outils et méthodes d'évaluation de la faisabilité d'implémentation du remanufacturing et nous nous focaliserons sur comment ces outils répondent aux critères de décisions au niveau stratégique, tactique et opérationnel.

1.4.1 Outils d'aide à la décision pour le remanufacturing et niveaux de décision :

L'étude de (Goodall et al., 2014) porte sur les outils d'aide à la décision pour l'évaluation de la viabilité et de la faisabilité du remanufacturing des articles publiés entre 2003 et 2013. Les articles de journaux sélectionnés dans l'étude de (Goodall et al., 2014) sont du nombre de 41 après filtrage par inspection des résumés ce qui fait une étude de 41 outils d'évaluation de la faisabilité du remanufacturing. Les outils mis en étude étaient classifiés suivant les trois niveaux traditionnels de décisions managériales, notamment, le niveau stratégique, le niveau tactique et le niveau opérationnel.

1.4.1.1 Niveau stratégique :

Les décisions stratégiques d'une entreprise portent sur les objectifs économiques et les missions de l'entreprise, elles sont orientées vers les aspects de commercialisation et les services proposés aux clients. Globalement, ça concerne les décisions qui permettent à l'entreprise de se positionner et d'interagir avec son environnement économique. Ces décisions sont prises par le haut sommet de l'entreprise et ses parties-prenantes et s'étendent sur le long-terme de son activité. Dans le cadre de l'évaluation du remanufacturing, les décisions stratégiques répondent à la question, est ce que le remanufacturing est une activité économique adaptée à l'entreprise ? Ceci a lieu, bien évidemment, en amont de l'implémentation du remanufacturing. Toutefois, le degré de précision et de détails reste plus faible qu'aux niveaux tactique et opérationnel. Ceci est dû à la portée long-terme des décisions stratégiques et la faible disponibilité d'informations précises et certaines au moment de la prise de décision. Les outils du remanufacturing destinés à l'aide aux décisions stratégiques se subdivisent en trois catégories. Au niveau stratégique, ces outils évaluent trois points : l'aptitude du produit à être

remanufacturé, l'intérêt économique de l'entreprise à remanufacturer ses produits et son aptitude interne à lancer le remanufacturing. La première catégorie d'outils consiste à étudier conceptuellement le potentiel du produit à être remanufacturé en FdV sans s'atteler sur l'état du produit au moment de son retour en FdV. Généralement, ces outils servent aux FEOs pour intégrer au produit, dès la phase de conception, des fonctions répondant aux exigences du processus du remanufacturing. Dans cette catégorie, nous trouvons, par exemple, l'outil Repro² de (Zwolinski et al., 2006). Cet outil a été élaboré à partir de l'analyse statistique des cas de produits les plus réussis en remanufacturing afin d'extraire les caractéristiques les plus significatives de ces produits. On trouve des critères touchant une variété d'aspects de remanufacturing comme, l'économie, la technologie, le marché, l'environnement, la valorisation et les tests. L'outil consiste en la comparaison d'un produit, à tester sa remanufacturabilité, avec les profils de produits remanufacturables préétablis suivant les critères énoncés ci-dessus. L'outil spécifie les caractéristiques valides du produit évalué et celles non valides dans l'intention d'aider les concepteurs à les améliorer, ainsi, permettre la remanufacturabilité du produit à concevoir. Dans la même catégorie, nous trouvons des outils qui servent à déterminer ou prédire la meilleure stratégie de FdV pour un produit donné (recyclage, réparation, remanufacturing, etc.). Ces outils sont basés sur la logique floue et la statistique bayésienne comme les outils de (Pochampally and Gupta, 2004) ou l'outil proposé par (Ghazalli and Murata, 2011) basé sur l'usage de Processus d'Analyse Hiérarchique (PAH). Au niveau des décisions stratégiques, plusieurs articles ont proposé des outils pour évaluer l'apport économique du remanufacturing et son intégration dans les modèles d'affaires comme les systèmes-produits-services (Intlekofer et al., 2010) ou le marché des pièces détachées (Inderfurth and Mukherjee, 2008).

1.4.1.2 Niveau tactique :

Les décisions prises au niveau tactique servent à mettre en place les décisions stratégiques et portent sur le moyen-terme avec un degré de précision et de détails plus important qu'au niveau stratégique. Les outils du niveau de décisions tactiques évaluent la remanufacturabilité des produits en phase de conception ou en phase de fin de vie. Ces outils tiennent en compte des informations plus détaillées sur le produit en creusant jusqu'au niveau des composants et des sous-assemblages grâce à la nomenclature du produit. (Du et al, 2012) propose une méthode d'évaluation à la fois **de la faisabilité technique**, par rapport à chacune des étapes du processus du remanufacturing, **de la faisabilité économique**, par l'évaluation du coût du processus et **de la faisabilité environnementale**, par le calcul des matériaux et de l'énergie récupérés et la

pollution rejetée. La méthode proposée est conçue pour le remanufacturing des outils de machine de fabrication. La pondération des indicateurs d'évaluation s'est faite grâce à l'AHP. La méthode proposée par (Du et al., 2012) est à un niveau de détails tactiques vu qu'elle tient compte des liaisons entre les composants pour évaluer le désassemblage et le réassemblage des produits, toutefois cette méthode ne tient pas compte de l'état du produit et de ses composants à leurs retour à l'atelier de remanufacturing en FdV.

Sur la fin de vie, on trouve l'étude de (Anityasari and Kaebernick, 2008) qui introduit les notions de fiabilité dans la détermination de la stratégie de fin de vie optimale entre réutilisation directe, remanufacturing ou recyclage. Cette méthode permet d'évaluer la meilleure stratégie de FdV à un stade primaire avant même qu'il y ait récupération et désassemblage du produit. Ces deux étapes du processus du remanufacturing imposent des coûts conséquents aux stratégies de fin de vie et qui pourraient être des étapes vaines si une deuxième vie du produit n'est pas possible. Toutefois, le choix de la fiabilité comme unique paramètre de performance de la deuxième vie d'un produit reste incomplet. Puisqu'il ne tient pas compte de la valeur du produit aux yeux des utilisateurs et ne tient pas compte des conditions d'usage et les spécificités de chaque produit. (DAIMON, 2003) font la distinction entre, d'une part, la durée de vie physique, définie comme le temps jusqu'à ce que le produit tombe en panne qui peut être indexée sur la fiabilité et d'une autre part, la durée de vie de la valeur du produit définie comme le temps jusqu'à ce que la fonctionnalité ou la détérioration de l'apparence ou la dépréciation par l'utilisateur rendent le produit obsolète. Pour un prolongement de la durée de vie les décisions doivent tenir compte de l'ensemble de ces paramètres. A cette limite, s'ajoute le manque de données statistiquement significatives sur les paramètres de fiabilité des produits en deuxième vie pour proposer des fonctions de fiabilité plus proches de la réalité. Plusieurs nouvelles études sur le « e-monitoring », qui s'intéressent aux problématiques de deuxième vie des produits, visent à pallier ce déficit par la mise en place de capteurs de suivi de l'état de santé des produits pour une récupération maximale des données durant la phase d'utilisation (Tsiliyannis, 2017).

Pour répondre à ce besoin de détermination de la vie ou la performance restante du produit, (Pandey and Thurston, 2009) proposent une méthode basée sur la notion de criticité (telle que définie en AMDEC, le produit de la probabilité d'occurrence et la gravité de l'impact, plus de détails au chapitre 3) pour évaluer l'âge restant de chaque composant. Une estimation de l'âge des composants qui ne dépend pas uniquement de l'âge chronologique. L'estimation tient compte des interactions entre ces composants représentées dans le diagramme d'interactions des flux d'informations, d'énergie et de matériaux entre ces composants.

D'autres outils qu'on peut classer au même niveau tactique mais qui interviennent durant la phase de conception valident la faisabilité du remanufacturing par des comparaisons de viabilité économiques et d'impacts environnementaux entre la fabrication d'un produit neuf et le remanufacturing du même produit pour une deuxième vie. Pour ces auteurs, les gains économiques et environnementaux sont la preuve de la viabilité du remanufacturing mais sans tenir compte des facteurs technologiques, sans lesquels le remanufacturing ne peut se réaliser. Parmi ces contributions, on trouve la proposition de (Krill and Thurston, 2005) qui consiste en l'augmentation de la conception des pièces d'usure pour protéger les composants clés contre l'usure prématurée. Ils proposent un outil aux concepteurs, sur la base d'une approche quantitative, permettant de trouver un compromis du nombre des pièces d'usures à insérer en conception à partir du calcul de l'impact économique et environnemental de la phase de production comparée à celle du remanufacturing. Des cas d'études ont appuyé cette proposition en évaluant l'intérêt de l'utilisation des chemises de cylindres dans deux types de moteurs thermiques à volume différent.

1.4.1.3 Niveau opérationnel

Les décisions opérationnelles agissent sur les détails du travail journalier afin de mettre en place le plan stratégique. Les outils de remanufacturing qui proposent de l'aide à la décision au niveau opérationnel évaluent la possibilité de remanufacturing d'un produit retourné au centre de remanufacturing. Contrairement aux outils d'aide à la décision stratégique ou tactique qui étudient la faisabilité du remanufacturing d'un produit d'un point de vue conceptuel, les outils opérationnels étudient l'état d'un produit au moment de son arrivée à l'atelier de remanufacturing. Ceci, afin de soutenir les opérateurs quotidiennement à valider la faisabilité de remanufacturing de ce produit sur base de facteurs environnementaux, économiques et techniques. Dans ce type d'outils, on trouve l'outil de (Zhou et al., 2012) qui consiste à quantifier le degré de réutilisation directe d'un composant au centre de remanufacturing en se basant sur l'AHP. Cet outil vise à réduire les tâches du remanufacturing laborieuses et coûteuses, à la fois économiquement et écologiquement, dans le cas où le composant présente un niveau de qualité acceptable pour une réutilisation directe. Ils proposent un système d'évaluation de réutilisation suivant des indicateurs dimensionnels, surfaciques, géométriques et de l'état de santé interne du composant. (Jun et al, 2012) proposent un outil servant pour la phase d'inspection du produit pour décider la stratégie de fin de vie qui sera accordée à chaque composant. Cet outil vise à minimiser la fonction coût total du traitement en FdV sous-

contraintes des conditions de qualité du produit. L'optimisation se fait grâce à des algorithmes heuristiques.

Dans d'autres travaux, comme dans (Kumar et al., 2007), on trouve des outils qui aident à la fois pour la prise de décision au niveau tactique et opérationnel, grâce aux estimations mathématiques de l'évolution de la valeur incarnée dans le produit, depuis sa création (en conception et mise en forme en production), durant sa consommation (en phase d'utilisation) et au moment de sa valorisation (en phase de fin de vie). Ici, la valeur se définit par les fonctions qui assurent de l'utilité du produit chez l'utilisateur. Les équations permettent d'évaluer monétairement la valeur restante du produit pour se décider sur la stratégie de fin de vie optimale.

1.4.1.4 Synthèse des outils de faisabilité de remanufacturing :

Les outils de remanufacturing étudiés à partir de la littérature et qui s'adressent à sa faisabilité de ce dernier portent sur les trois niveaux de décision, stratégique, tactique et opérationnel. On observe une abondance des outils destinés aux décisions stratégiques et tactiques avec des évaluations par rapport aux facteurs, majoritairement, économiques et environnementaux et moins technologiques. Ceci, peut s'expliquer par le caractère récent de l'intérêt des industriels, à qui ces outils leur sont destinés en premier, à implémenter le remanufacturing. Les industriels veulent principalement étudier la viabilité économique du remanufacturing au long terme et les gains environnementaux qui seront obtenus. Un deuxième point peut expliquer cet engouement des chercheurs pour ce type d'outils est la volonté de démontrer que le remanufacturing est une stratégie à la fois bénéfique d'un point de vue économique et d'un point de vue environnemental pour les entreprises, ainsi, inciter les entreprises à adopter le remanufacturing comme une voie de transition écologique de l'industrie. Les outils stratégiques et tactiques traitent essentiellement du potentiel des produits à être remanufacturés en FdV, en évaluant la possibilité des produits au niveau conceptuel de désassemblage, de réassemblage, etc. Une fois le produit attesté compatible, par ces outils, pour le remanufacturing en FdV, ces outils n'apportent pas de réponses aux problématiques quotidiennes dans les centres de Remanufacturing, relatives à l'implémentation directe du processus de remanufacturing et la prise de décision quotidienne de l'acceptation ou du rejet des produits récupérés, sur base de la qualité de ces derniers. L'importance de développer des outils au niveau opérationnel répondant à ces questions est grandissante pour l'accompagnement des entreprises qui se lancent concrètement dans la voie du remanufacturing. Sans ces outils, les entreprises peuvent implanter le processus du

remanufacturing sur base de la validation des outils stratégiques et tactiques mais une fois le remanufacturing lancé, cet investissement peut être voué à l'échec par faute de rentabilité économique ou environnemental et par cause de cumul de mauvaises décisions, en acceptant systématiquement le remanufacturing de tous les produits récupérés par exemple.

Nous avons décidé d'étudier, à partir de la littérature, uniquement les outils du remanufacturing qui portent sur les facteurs économiques, environnementaux et technologiques. Comme explicité auparavant le choix de ces facteurs d'études émane des motivations et des barrières que rencontrent les entreprises à l'implémentation du remanufacturing.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu les fondements théoriques de l'économie circulaire et ces stratégies qui permettent de préserver la matière et de créer la valeur économique. Une des stratégies industrielles phares de l'économie circulaire est le remanufacturing. Plusieurs types d'entreprise, motivés par des ambitions différentes, implémentent l'activité de remanufacturing et font face à différentes barrières pour la réussite de l'activité de remanufacturing. Nous nous intéresserons au type Indépendant-R. Nous avons identifié l'écart de la littérature relatif aux outils de faisabilité du remanufacturing par rapport aux barrières et motivations de ce type de Remanufacturer. Il apparaît que le manque d'outillage de niveau opérationnel est un frein important. Dans le chapitre suivant nous présenterons les problématiques de recherches qui seront abordées dans la suite et la méthodologie de recherche qu'on adoptera pour répondre à ces questions de recherche.

Chapitre 2. Questions de recherche et la démarche de recherche

2.1 Objectif de ce travail

L'objectif de cette étude est de fournir une compréhension de la volonté des entreprises commerciales à développer une activité de remanufacturing, et de proposer un cadre méthodologique, basé sur les spécificités techniques et économiques de ces entreprises, qui leurs permettra de réaliser la transition à une activité industrielle (remanufacturing) intégrée dans l'économie circulaire. Ce cadre méthodologique sera destiné aux décideurs des entreprises commerciales de produits physiques pour les supporter dans cette transition. Ce cadre sera expérimenté sur une étude de cas d'entreprise commerciale dans le but de tirer les conclusions sur la faisabilité d'intégration du remanufacturing comme une des boucles de l'économie circulaire, chez les entreprises commerciales. Nous traiterons la question de recherche suivante :

« Comment intégrer le processus de Remanufacturing dans les entreprises commerciales dans la perspective de la transition vers l'économie circulaire ? »

Pour atteindre ces objectifs de recherche, nous jugeons essentiel de préciser le paradigme épistémologique dans lequel s'inscrit cette étude, puis de détailler l'approche méthodologique de recherche qui sera basée sur une étude de cas et les outils méthodologiques des sciences de l'ingénieur choisis pour répondre à chacun des verrous de cette étude. Cette étude est un projet de recherche qui se situe au cœur du génie industriel mais toutefois il porte sur plusieurs aspects des sciences de l'ingénieur (génie mécanique, calcul impacts environnementaux, etc.).

2.2 Unicité-exploration de la recherche

Comme étayé dans la revue de littérature, l'intégration de l'activité du remanufacturing dans les entreprises commerciales non-manufacturières reste, à notre connaissance, pas encore traitée dans la littérature scientifique. Cette transition de ces entreprises aura un potentiel prometteur dans le basculement de masse de l'économie linéaire à l'économie circulaire mais les travaux et études scientifiques sur la transformation et la proposition d'outils ciblés pour ces entreprises restent limités.

Ce travail de recherche s'intègre dans un cadre de recherche exploratoire (Voss, 1999). En effet, cette thèse a pour objectif d'analyser l'intégration du processus de remanufacturing par une entreprise de vente non-manufacturière et de proposer des outils adaptés pour relever les difficultés inhérentes à cette transition dans le cas de ce type d'entreprise. Les résultats de cette étude doivent être opérationnels et utiles à ce type d'entreprise.

2.3 Cas d'étude : L'entreprise Aqua-assainissement et le projet RE-UT

L'émanation de la problématique industrielle qu'on compte traiter par ce travail, provient principalement du cas de l'entreprise Aqua-assainissement. Il s'agit d'une jeune entreprise commerciale, créée en 2015 et comptant 3 salariés, pour proposer aux professionnels des services d'assainissement et aux particuliers, à partir de la boutique en ligne, l'ensemble des composants, pièces détachées et accessoires pour les micro-stations d'assainissement agréées et pour leurs entretiens.



Figure 7 : *Produits principalement vendus par Aqua. De gauche à droite : Moteur électrique, compresseur, pompe.*

Aqua met en vente principalement trois produits pour les micro-stations, des compresseurs d'air, des moteurs électriques et des pompes à eau, Figure 7.

Le marché de l'Assainissement Non Collectif représente 5 millions d'installations en France. Les installations de type micro-station comptent environ 15% du marché. L'entreprise Aqua a décidé de se lancer dans le remanufacturing des composants des micro-stations à partir du constat que le parc existant entre en phase de vieillissement. Donc, un renouvellement des installations actuelles est nécessaire, de plus, le marché est en expansion.

Face à ce marché en expansion, Aqua cherche à répondre à ses besoins en lançant le projet RE-UT. Un projet inscrit dans l'économie circulaire qui vise à étendre la vie des produits en FdV. Par le projet RE-UT Aqua espère dans 5 ans, générer un chiffre d'affaire annuel de 100 000 euros et éviter les impacts dus à la mise en décharge de 1 tonne de compresseur par an. Un résultat qui permettra à l'entreprise de se démarquer par rapport à la concurrence, notamment les grandes boutiques en ligne, Amazon par exemple, et d'élargir même ses revenus dans le marché du neuf. Ce postulat, exprimé par l'entreprise Aqua, s'aligne avec les résultats de l'enquête réalisée par (Carillo, 2007) sur les entreprises concernées par l'écoconception en France. Cette enquête à chercher à identifier les leviers d'intégration de l'environnement en conception. En premier levier vient la différenciation avec la concurrence puis d'autres leviers, dont l'engagement de la direction et l'orientation du marché vers des produits plus respectueux.

Le démarrage et la phase d'expérimentation du projet RE-UT était financé par l'ADEME. L'étude du projet a compris 3 collaborateurs majeurs : l'entreprise Aqua-assainissement, le

bureau d'étude DECODEX pour l'analyse de matière des composants du produit et le laboratoire G-SCOP pour répondre aux problématiques, techniques, technologiques et environnementales de l'intégration du remanufacturing chez Aqua. Ces axes sont l'objet de ce travail de thèse.

A la fin de la première année du projet RE-UT, ce projet a été lauréat du trophée « ECO-INNOVEZ » édition 2018¹. Le dossier de presse publié par les organisateurs du trophée sur le projet RE-UT est sur le lien ci-dessous².

2.4 Méthodologie de recherche

Comme présenté, la question de recherche a été relevée à partir d'une problématique industrielle à laquelle étaient confrontés les praticiens de l'entreprise AQUA. Notre intention, dans ce travail de thèse, est de construire, d'une part, une proposition de connaissances applicables par les praticiens partenaires de ce projet et d'une autre part, une connaissance théorique permettant de remplir l'écart de la littérature autour des questions formulées. Tenir ce double objectif, crée souvent un dilemme entre la scientificité des résultats et leur pertinence pratique dans les sciences du management (Cummings, 2007). (Kieser and Leiner, 2009) jugent même que le fossé est infranchissable. Pour ces derniers, la science doit être menée suivant le paradigme épistémologique positiviste en excluant les autres paradigmes notamment le constructivisme. Pour remédier à cela, (Avenier, 2009) propose un cadre méthodologique aménagé, inscrit dans le constructivisme radical, permettant de concilier la scientificité et l'actionnabilité du savoir. Le constructivisme radical, tel que proposé par (Von Glasersfeld, 1988) « rompt avec la convention, et développe une théorie de la connaissance dans laquelle la connaissance ne reflète pas une réalité ontologique « objective », mais concerne exclusivement la mise en ordre et l'organisation d'un monde constitué par notre expérience ». En d'autres termes, les résultats de la construction de connaissances se définissent et se redéfinissent le long de cette construction et en liaison avec cette dernière dans un processus d'auto-finalisation (Avenier, 2011).

2.4.1 Définition de la question de recherche :

La première étape de l'approche méthodologique proposée par (Avenier, 2009) est la définition de la question de recherche. Pour cela, en premier temps il y a eu plusieurs réunions

¹ <https://eco-innovez.com/laureats/remanufacturing-chez-aqua-assainissement/>

² https://www.aqua-assainissement.info/wp-content/uploads/2018/09/20180913-Dossier-de-presse_Trophees2018_LaureatService.pdf

avec les praticiens (gérant et techniciens d'AQUA) qui ont permis d'explicitier les problèmes contextualisés auxquels ils font face. Suite à ces réunions, il était nécessaire de regrouper et de reformuler ces partitions de problèmes en une question de recherche générique. En deuxième temps, on a effectué une revue de littérature approfondie par rapport à la question de recherche générique et les sous-problèmes relevés un par un. Dans la démarche d'Avenier la revue de littérature à un double objectif, le premier est d'examiner ce que les « savoirs publiés » apportent sur la problématique pratique. Dans le cas où ces résultats ont une réponse satisfaisante à quelques sous-problèmes formulés, on procède à l'« activation de ces savoirs ». Le deuxième objectif était d'identifier l'écart de la littérature ou « le vide théorique », exprimé par la question générique après échanges avec les praticiens, que notre étude cherchera à combler d'une façon satisfaisante par la réponse à la problématique. Notre question de recherche était formulée de sorte à pouvoir conceptualiser et décontextualiser nos propositions de savoirs répondant aux problèmes rencontrés par les praticiens d'Aqua, pour que ces savoirs servent à d'autres praticiens faisant face à la même problématique.

2.4.2 Validation et activation des savoirs :

Dans le paradigme constructiviste radical, précisément dans l'approche d'Avenier, il n'est pas question de valider les connaissances, mais plutôt de légitimer ces connaissances. La légitimation s'obtient en deux temps. En premier temps, par la mise en pratique des connaissances et il revient aux praticiens d'évaluer ou percevoir l'actionnabilité de ces connaissances. En deuxième temps, par la communauté scientifique lorsque ces connaissances relatives à un problème pratique viennent combler un vide théorique. La légitimation des résultats de recherche n'a pas lieu d'être en aval de l'élaboration des connaissances, mais ces deux processus sont simultanés et indissociables (Avenier, 2009). En effet, la légitimation permet de franchir le fossé entre la scientificité des savoirs et l'activation de ces savoirs en pratique. Ceci, grâce à la reconnaissance de la communauté scientifique et la diffusion de ces savoirs auprès des praticiens. Toutefois, la légitimation des savoirs exigent une description détaillée des méthodes de construction de ces savoirs afin que les résultats soient réitérables et reproductibles (Avenier, 2009).

2.5 Les verrous scientifiques de l'intégration du processus du remanufacturing par les entreprises commerciales :

2.5.1 La nécessité d'outiller les entreprises commerciales pour l'implémentation du remanufacturing :

Précédemment, nous avons montré que les caractéristiques inhérentes aux entreprises commerciales créent des difficultés supplémentaires pour l'implémentation du remanufacturing. Ces entreprises lancées dans la dynamique de transition vers les stratégies de l'économie circulaire se heurtent au manque de méthodes et d'outils au niveau opérationnel. Des outils capables de surmonter le déficit de connaissance de ces entreprises en remanufacturing afin d'atteindre les bénéfices environnementaux et économiques. Ces bénéfices sont les principales attentes recherchées par l'implémentation du remanufacturing par ce type d'entreprise. Dans ce contexte, nous rappelons notre question de recherche générique :

« Comment intégrer le processus de Remanufacturing dans les entreprises commerciales dans la perspective de la transition vers l'économie circulaire ? »

Les études préliminaires du terrain industriel, associées à l'étude bibliographique nous ont permis de définir trois verrous scientifiques qu'on souhaite lever pour répondre à la question de recherche générique.

2.5.2 Verrou 1 : Le diagnostic de produits en fin de vie le plus en amont du processus du remanufacturing.

La réussite des objectifs stratégiques du remanufacturing sur le plan économique et environnemental dépend des décisions prises quotidiennement au niveau opérationnel. L'une des décisions importantes concerne la possibilité de remanufacturing d'un produit en FdV. Cette décision est principalement soutenue par le diagnostic de l'état du produit en FdV. Une mauvaise décision, un rejet d'un bon produit ou une acceptation d'un mauvais produit, pénalise les résultats économiques et environnementaux du remanufacturing. Il existe plusieurs outils d'évaluation de la Remanufacturabilité des produits. Généralement ces outils proposent des indicateurs économiques, environnementaux, et techniques pour évaluer la Remanufacturabilité mais sans qu'ils s'attardent sur le diagnostic du produit à l'entrée du processus. De plus, ces outils évaluent la faisabilité sur un plan conceptuel et non à un niveau de décision opérationnelle. De ceci, il est nécessaire de proposer une méthode capable de diagnostiquer d'une façon individualisée et ciblée les produits en FdV le plus en amont possible du processus du remanufacturing. Pour cela nous proposons une méthode de diagnostic à partir des symptômes du produit en FdV. Nous comptons lever ce verrou grâce à l'adaptation de

l'AMDEC pour les produits en FdV. La méthode nous permettra de recenser systématiquement tous les modes de défaillances possibles et de proposer une grille de diagnostic aux opérateurs afin d'identifier simplement et rapidement les défaillances à l'entrée du processus du remanufacturing.

2.5.3 Verrou 2 : La re-conception des composants pour la fabrication additive en remanufacturing.

On a vu dans la littérature que les stratégies de récupération des produits en fin de vie présentent plusieurs avantages et de réelles opportunités environnementales et économiques. Cependant, des obstacles subsistent pour l'accomplissement des objectifs de ces stratégies. L'une des majeures causes de complexité rencontrées dans le processus du remanufacturing est la large variabilité de quantité et de qualité des produits retournés (Zwolinski et al., 2006). Ceci est dû au fait que chaque produit a un historique de fonctionnement propre à lui, impliquant un état de santé en fin de vie très variable d'un produit à un autre. La difficulté rencontrée dans les processus de remanufacturing vient de la nécessité de ramener les produits en fin de vie qui ont des qualités variables à des produits de même qualité que le produit neuf. Une variabilité à l'entrée des systèmes de remanufacturing qui implique une adaptabilité et une grande réactivité de ces processus. Les incertitudes de la qualité des produits en fin de vie nécessitent des modes d'inspection exhaustifs (1^{er} verrou) ainsi qu'un processus de remanufacturing reconfigurable, adaptable aux proportions de quantités retournées et capables de saisir la variabilité qualitative constatée en fin de vie. Un processus qui doit être équipé de technologies flexibles capables de maîtriser la diversité qualitative des produits et composants en fin de vie. D'un autre côté, la fabrication additive se présente en tant qu'un processus extrêmement flexible (Achillas et al., 2017). Ceci, grâce à la liberté de production que permet la fabrication additive par l'ajout de matière sans outillage spécial et la possibilité de fabrication directement à partir d'une conception digitale. Il s'agit d'une technologie agile, rapide, flexible et rentable, en termes d'utilisation de peu de matériaux et d'outils (Hedges and Calder, 2006). Ainsi, son intégration dans l'industrie du remanufacturing peut répondre aux problématiques d'incertitude des produits et de flexibilité des systèmes. La fabrication additive présente un avantage très important pour les processus de remanufacturing par la possibilité d'ajout direct de la matière sur les produits ou composants en fin de vie. Toutefois, les composants existants nécessitent une re-conception pour rendre possible leur remanufacturing par fabrication additive et pour assurer les mêmes fonctions pour lesquels ils étaient initialement conçus. Pour lever ce verrou,

nous proposons une méthode de sélection des composants à remanufacturer par FA, puis une méthode de re-conception pour la FA en remanufacturing. On illustrera les méthodes par le cas d'étude du compresseur d'air de l'entreprise Aqua.

2.5.4 Verrou 3 : Les bénéfices environnementaux et économiques face à la variabilité de l'état des produits à remanufacturer.

Les indépendants-R espèrent par l'activité du remanufacturing accroître leurs profits en proposant des produits qui évitent des impacts environnementaux dus à la production du neuf. Plusieurs études affirment les importants avantages économiques et environnementaux du remanufacturing (Hatcher et al., 2013), (Lund, 1985). Toutefois, ces affirmations nécessitent des démonstrations de cas de produits Remanufacturés qui ont permis à la fois aux indépendants-R un gain économique et un évitement d'impacts environnementaux dus à la production du neuf. L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est un outil qui permet d'évaluer les impacts environnementaux des produits et services. De toutes les ACVs existantes dans la littérature scientifique, celles sur les produits Remanufacturés présentent une très faible proportion (Peters, 2016). Dans l'absence de guidelines précises sur l'ACV des produits Remanufacturés, ces études restent controversées par les hypothèses disparates, d'une étude à l'autre, sur la définition de l'unité fonctionnelle, sur les frontières du système, etc., menant à des résultats très divergents sur l'impact des produits Remanufacturés. Pour exemple, deux ACVs ont été réalisées sur un compresseur d'air, la première obtient un résultat que le compresseur Remanufacturé permet une réduction de 96% des émissions en CO₂ et la deuxième conclut qu'il ne permet une réduction que 46% des émissions. Sur le plan économique, les entreprises qui se lancent en remanufacturing tout en maintenant la vente du neuf et du remanufacturé, comme l'entreprise à l'étude, craignent que le remanufacturing affecte la vente des produits neufs (Kwak and Kim, 2017). La cannibalisation est considérée comme une barrière majeure face au remanufacturing et ces entreprises estiment que les produits remanufacturés cannibalisent leurs ventes de produits neufs (Jr and Li, 2010). Tenant compte que le produit remanufacturé a la même qualité que le produit neuf mais à un prix plus bas, le remanufacturing peut réduire les ventes des produits neufs qui présentent généralement une marge plus importante de bénéfices. D'autant plus que ce phénomène est encore plus important pour les produits qui ne sont pas dotés d'une très grande technologie. La cannibalisation est difficile à contrôler parce qu'elle dépend du comportement et des préférences du consommateur. Face à cette situation, l'indépendant-R doit s'assurer que son activité de vente des produits neufs et remanufacturés est optimisée en termes de bénéfices

économiques et environnementaux. Nous abordons dans le chapitre 5 les points de controverses des ACVs pour les produits remanufacturés et nous proposons une ACV du compresseur d'air remanufacturé par l'entreprise à l'étude. Nous étudierons également l'effet de cannibalisation des produits neufs par les produits remanufacturés et nous proposerons une méthode qui permettra à l'entreprise d'optimiser les bénéfices environnementaux et économiques.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous venons de présenter le cadre épistémologique 'recherche-action' que nous adoptons pour notre étude. Le choix de ce cadre justifie notre démarche de recherche qui vise à fournir des connaissances actionnables pour l'entreprise Aqua et d'apporter des savoirs répondants aux écarts scientifiques spécifiés. Nous avons défini les trois verrous scientifiques permettant de répondre à notre question de recherche générique. Dans la suite, nous traiterons dans chaque chapitre un des verrous scientifiques évoqués. La Figure 8 résume les questions de recherche qui seront abordées avec les objectifs pour chacune des questions.

Question de Recherche générique: Comment intégrer le processus de Remanufacturing dans les entreprises commerciales dans la perspective de la transition vers l'économie circulaire ?

| Objectifs de recherche | Écarts de recherche | Sous-questions de Recherche | Verrous scientifiques | |
|---|--|--|--|-------------------|
| Méthode de diagnostic des produits en FdV à partir des symptômes. | Plusieurs outils d'évaluation de la Remanufacturabilité existent. Toutefois, ces outils proposent de l'aide à la décision aux niveaux stratégiques et tactiques sur des aspects de conception. Très rares sont les outils de décisions opérationnels. | Comment concevoir un modèle de niveau de décision opérationnelle pour l'inspection des produits en fin de vie intégrant les modes de défaillances et les symptômes? | Le diagnostic de produits en fin de vie le plus en amont du processus du Remanufacturing. | Chapitre 3 |
| <ul style="list-style-type: none"> - Méthode de sélection des composants en FdV pour le Remanufacturing par F.A. - Méthode de re-conception des composants en FdV pour la F.A. | Peu d'études traitent l'usage de la fabrication additive en processus de Remanufacturing. Encore moins, les études sur les méthodes de sélection des composants remanufacturables par F.A et les modèles de re-conception des composants pour F.A en Remanufacturing. | Comment re-concevoir les composants en fin de vie pour fabrication additive en processus de Remanufacturing? | La re-conception des composants pour la fabrication additive en Remanufacturing. | Chapitre 4 |
| <ul style="list-style-type: none"> -Analyse environnementale et économique du produit remanufacturé Hiblow HP80. -Méthode d'optimisation des résultats économiques et environnementaux. | Les évaluations environnementales du Remanufacturing tiennent compte que rarement de plusieurs cycle de vie dans les frontières de l'étude. On note une absence d'analyse de cycle de vie intégrant la variabilité de l'état des produits en FdV. Pour la comparaison économique entre neuf et remanufacturé, les études existantes n'intègrent pas l'effet de cannibalisation dans le calcul des bénéfices. | Comment évaluer les bénéfices environnementaux et économiques des produits remanufacturés comparés aux produits neufs face à la large variabilité de l'état des produits en FdV? | Les bénéfices environnementaux et économiques face à la variabilité de l'état des produits à remanufacturer. | Chapitre 5 |

Figure 8 : Questions de recherche, objectifs de recherche et les écarts de recherche.

Chapitre 3. Le diagnostic de produits en fin de vie le plus en amont du processus du Remanufacturing.

3.1 Introduction

Comme on a vu précédemment, dans la mise en place du remanufacturing, les Indépendants-R font face à la barrière de la connaissance technique autour du produit, de sa conception, de sa fabrication et de son fonctionnement. Une barrière inhérente à la nature de ce type de Remanufacturer. Une caractéristique qui s'accroît encore plus dans le cas de l'entreprise de notre étude, au vu de la nature de son activité qui est purement commerciale et non manufacturière. Globalement, on constate chez ces entreprises une faible maîtrise des connaissances des métiers en amont de la commercialisation du produit. Une réalité qui rend la mise en place du processus du remanufacturing, par ces entreprises, compliquée, encore davantage en l'absence d'outils et méthodes adaptés et pouvant répondre à cette problématique. Nous avons observé également que dans la littérature il y a un manque d'outil de remanufacturing au niveau de décisions opérationnelles sur l'état des produits retournés. Par la proposition d'élaborer un outil dédié au diagnostic des produits retournés, nous cherchons à développer un outil de diagnostic pérenne au-delà de la phase de mise en place du remanufacturing, mais surtout, un outil permettant de supporter les techniciens dans l'appropriation des connaissances de fonctionnement du produit, des dysfonctionnements potentiels de ce dernier et de la Remanufacturabilité des composants.

3.2 L'AMDEC, de la production au remanufacturing

L'Analyse des Modes de Défaillances de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) a été développée par l'armée américaine à la fin des années 40. La méthode a été développée dans l'optique de résoudre les dysfonctionnements des munitions en éliminant les causes racines. Trente ans plus tard, l'AMDEC connaît un succès dans l'industrie du nucléaire et de l'aérospatiale, au point que la NASA attribue le succès de la mission Apollo 11, la première fois qu'un être humain marche sur la lune, à l'utilisation de l'AMDEC (Stamatis, 2003). Après ce succès, plusieurs industries adoptent également l'AMDEC, dont l'industrie automobile qui l'intègre dans la norme QS9000. L'Association Française de Normalisation (AFNOR) définit l'AMDEC en tant qu'une *'méthode inductive qui permet de réaliser une analyse qualitative et quantitative de la fiabilité ou de la sécurité du système'*. On trouve plusieurs familles d'AMDEC qui agissent sur différentes échelles (AMDEC-organisation, Processus, Produit, Service, Moyen, etc.). Nous nous intéressons, dans la suite, à l'AMDEC-produit qui est généralement utilisée en phase de conception pour étudier en détails les dysfonctionnements potentiels d'un produit.

3.2.1 Déroulement de l'AMDEC

(Ford, 2011) décrit l'AMDEC comme un ensemble d'activités systématiques permettant d' :

- Evaluer et identifier les défaillances potentielles d'un système et leurs effets ;
- Identifier les actions qui peuvent éliminer ou réduire l'apparition des défaillances potentielles ;
- Enrichir la documentation afin de définir ce qui peut être amélioré en conception ou en production pour mieux satisfaire le client.

Il s'agit d'un outil qualitatif et systématique qui aide à anticiper ce qui peut être défaillant dans un produit. L'usage de l'outil AMDEC repose sur cinq étapes principales qui se déroulent en deux temps :

- Le premier temps consiste en la réunion des experts représentant plusieurs expertises complémentaires, comme la conception et la fabrication, etc. Ces experts se réunissent pour identifier les modes de défaillances potentiels du produit lors d'une séance remue-méninges. L'ensemble des fonctions, des composants et des sous-systèmes qui peuvent potentiellement faillir à satisfaire les besoins de l'utilisateur doivent être identifiés, ainsi que les causes et les effets de leurs défaillances.

- Le deuxième temps consiste en l'élaboration d'un tableau, généralement sous forme d'une feuille de calcul d'un tableur, contenant les modes de défaillances, à chacun des modes de défaillances est attribué un indicateur de gravité, d'occurrence et de détectabilité. La criticité de chaque mode de défaillance s'obtient par la multiplication de ces trois paramètres. Cette dernière permet de prioriser les actions à mener pour corriger les défaillances.

Quant aux quatre étapes principales de l'AMDEC, on trouve (Kara-Zaitri et al., 1991) :

- La définition du système à étudier notamment ses exigences fonctionnelles et de performance.
- L'identification des modes de défaillances et les causes et effets associés.
- Calcul de l'Indice de Priorité des Risques (IPR) pour chacun des modes de défaillances enregistrés.
- Mise en place d'actions correctives pour réduire ou éliminer les causes potentielles des défaillances.

3.2.2 De l'importance du Diagnostic en remanufacturing

Le diagnostic des produits en fin de vie relève d'une grande importance pour la réussite du processus de remanufacturing. Un diagnostic ciblé permet un gain colossal en temps et en coûts économiques et environnementaux du processus de remanufacturing (Matsumoto et al., 2016). Le diagnostic fournit une image instantanée de l'état des produits à leurs entrées en processus du remanufacturing. Plus cette image est précise, plus on connaît le potentiel remanufacturable du produit et on peut définir les étapes nécessaires pour que le produit se mette à une qualité identique du produit neuf. Une image de diagnostic imprécise induit une plus forte probabilité de mauvaises décisions. Il existe deux types de mauvaises décisions qui peuvent être prises à la suite du diagnostic, garder en ligne de remanufacturing un produit qui ne peut être remanufacturé ou rejeter un produit qui est remanufacturable. La première décision engage en vain un coût et un temps supplémentaires et la deuxième fait perdre un gain potentiel à l'entreprise. Les travaux existants sur le diagnostic en remanufacturing portent principalement sur les outils technologiques permettant de contrôler l'état de santé et les caractéristiques des produits en FdV (Zhou and Piramuthu, 2013). Ces travaux proposent des outils de contrôles non destructifs, l'usage des capteurs intégrés aux produits pour alerter de l'état du produit durant sa phase d'utilisation et de sa phase de FdV (Zhou and Piramuthu, 2013). Dans ces travaux on trouve rarement des méthodes qui permettent d'accompagner les techniciens durant le diagnostic des produits retournés afin d'optimiser le processus du remanufacturing. Comme mentionné dans chapitre1, les outils existants d'étude de faisabilité de remanufacturing des produits portent sur des décisions de niveau tactique et non de niveau opérationnel. Comme l'outil qui étudie la recyclabilité des produits dès la phase de conception (de Aguiar et al., 2017).

3.2.3 L'AMDEC en remanufacturing

Dans la littérature, on trouve peu de travaux qui utilisent l'AMDEC pour le diagnostic des produits en remanufacturing. (Lam et al., 2001) ont utilisé l'AMDEC pour identifier les modes de défaillances les plus répandues dans la filière des déchets de l'industrie automobile, ceci, afin de comprendre pourquoi les Remanufacturers ne réussissent pas à remettre à neuf ces produits. Dans cette proposition d'AMDEC pour le remanufacturing, les deux indicateurs, l'occurrence et la détectabilité, sont restés inchangés par rapport à l'usage habituel de l'AMDEC, en revanche, la gravité était remplacée par la réparabilité qui représente le degré auxquels les composants peuvent être réparés par le Remanufacturer avec succès. Grâce au calcul de l'IPR (l'IPR est le produit des 3 paramètres, l'occurrence, la détectabilité et la

réparabilité), l'étude conclut sur le mode de défaillance le plus récurrent en fin de vie des produits en industrie automobile qui est l'usure des surfaces des composants. Des actions effectuées sur la conception et les processus de production visant la réduction de l'IPR peuvent améliorés dans le futur le remanufacturing de ces produits. (Abu et al., 2013) utilisent l'AMDEC en remanufacturing afin d'identifier et de minimiser la fréquence des défaillances qui se produisent durant le désassemblage des produits à remanufacturer. L'objectif est de remonter les informations afin de permettre une conception pour le remanufacturing plus robuste. (Russo et al., 2016) proposent, dans une stratégie de Système Produit Service, un outil de diagnostic des défaillances (FIT : Fault Investigator Tool) basé sur les méthodes AMDEC et TRIZ. L'outil permet à travers une liste de 150 questions fournie à l'utilisateur d'identifier le composant qui cause le dysfonctionnement. Toutefois, l'usage de l'outil reste appliqué dans une logique de réparation et non de remanufacturing des produits en fin de vie. L'usage de l'AMDEC en remanufacturing se limite généralement à un outil de recensement des défaillances les plus répandues des produits en FdV. Il sert à obtenir des données du terrain de l'état des produits en FdV, une fois traitées, ces données sont intégrées en conception dans le but d'éliminer ces défaillances qui peuvent entrainer les produits à une FdV prématurée.

3.3 AMDEC un outil pour le diagnostic des produits à remanufacturer

Cette partie présentera le modèle d'élaboration de la grille de diagnostic des produits retournés pour remanufacturing à partir des modifications apportées à la méthode AMDEC.

Les indépendants-R n'ont pas la connaissance du produit ni des processus en amont, une caractéristique qui s'accroît encore plus quand il s'agit d'une entreprise commerciale. Face à cette difficulté, la compréhension et la maîtrise du fonctionnement et du dysfonctionnement du produit ainsi que la définition de ses exigences fonctionnelles s'impose comme une première étape pour le lancement du remanufacturing. Cette appropriation technique du produit s'acquiert grâce à l'ingénierie inverse et les outils de l'analyse de valeur afin de définir les fonctions principales et secondaires que le produit devait satisfaire en première vie. Les outils de l'analyse de valeur permettent une expression des fonctions et des exigences clients, quant aux outils d'ingénierie inverse permettent une quantification de ces caractéristiques à partir des produits neufs.

En FdV, les produits au centre de remanufacturing arrivent dans des conditions variées (casse, dysfonctionnement, etc.) d'un produit à un autre en fonction de l'historique de production et de fonctionnement de chaque produit. Le processus de remanufacturing doit

répondre à chacune des défaillances et chacun des dysfonctionnements de chaque composant/produit et les remettre à neuf indépendamment de leurs historiques d'usage et de productions. Pour répondre correctement à cette variété des conditions des produits retournés en FdV, il est nécessaire en première étape de recenser cette variété pour ensuite pouvoir proposer une grille de diagnostic qui permet d'identifier les défaillances plus rapidement. L'élaboration de l'outil de diagnostic passe par deux étapes. En premier temps, il est nécessaire de recenser systématiquement toutes les défaillances qui peuvent exister et en deuxième temps de proposer une méthode pour identifier ces défaillances le plus rapidement et le plus facilement. L'outil AMDEC nous permet d'atteindre ces deux objectifs.

3.3.1 Etapes de l'AMDEC pour le remanufacturing

Pour élaborer la grille de diagnostic des produits en FdV, nous adapterons l'AMDEC pour cet objectif et nous le définissons à partir des affirmations initiales de l'AMDEC :

- Evaluer et identifier les défaillances potentielles d'un produit et leurs effets (schématisation entre le symptôme et le mode de défaillance) ;
- Définir les étapes de remanufacturing qui permettent de corriger les défaillances et remettre les composants à neuf ;
- Remonter les défaillances observées en FdV pour améliorer la conception et la fabrication des produits.

En ce qui concerne les étapes d'exécution de l'AMDEC modifié pour le remanufacturing :

- La définition du système à étudier notamment ses exigences fonctionnelles et de performance ;
- L'identification des modes de défaillances et effets associés ;
- Schématisation de la mise en lien entre les modes de défaillances et leurs symptômes ;
- Calcul de l'IPR1 et l'IPR2 pour chacun des modes de défaillances enregistrés ;
- Elaboration d'une grille de diagnostic des produits retournés.

Dans la suite nous présenterons en détails les cinq étapes de réalisation de l'AMDEC pour le remanufacturing afin d'obtenir la grille de diagnostic des produits à l'entrée du processus du remanufacturing.

3.3.1.1 Description du produit et analyse des composants

La première étape de la méthode proposée est l'élaboration d'une description détaillée du produit. Une description qui comprend en première partie, la définition des fonctions

principales du produit et des exigences des utilisateurs grâce aux outils de l'analyse de valeur. En deuxième partie, une nomenclature détaillée du produit contenant les composants constituants et leurs matériaux. La description du produit doit répondre aux questions du genre : Quelles sont les caractéristiques techniques du produit ? Par quels matériaux est constitué chaque composant ? Quelles sont les conditions de fonctionnement du produit ?

L'analyse des composants peut se faire en même temps que l'élaboration de la nomenclature au moment du désassemblage du produit. Le désassemblage permet d'avoir une vue éclatée sur le produit qui permet de comprendre le rôle de chaque composant dans la réalisation de sa fonction principale. Au moment de l'analyse des composants il est important d'établir les interrelations entre ces composants en se basant sur le diagramme de flux (IBD), Figure 10.

Le développement de la connaissance autour du produit se base sur les deux formes de données, primaires et secondaires. Les données primaires concernent essentiellement les travaux existant dans la littérature scientifique ainsi que les données et les informations issues des documents du fabricant original comme les manuels d'instruction et d'usage. Quant aux données secondaires, elles proviennent directement de l'atelier du Remanufacturier au moment des ateliers de désassemblage pré-projet et de caractérisation du produit à remanufacturer.

En deuxième temps, il faut établir une classification fonctionnelle des composants en les regroupant en sous-systèmes du produit. Ceci, s'obtient grâce à l'identification des fonctions de chaque composant d'un côté et l'identification des sous-systèmes fonctionnels d'un autre côté.

3.3.1.2 Analyse des modes de défaillances potentiels

L'objectif de cette étape est d'étudier l'effet de tous les modes de défaillances possibles de chacun des composants et de connaître comment ils peuvent empêcher potentiellement la réalisation des fonctions du produit, ainsi, la satisfaction des exigences des utilisateurs. Pour ceci, il est nécessaire d'établir, un diagramme qui permet d'identifier clairement les séquences du flux fonctionnel et de préciser les dépendances de flux entre les composants. Pour cela, nous comptons nous servir du Diagramme de Bloc Interne (IBD) puisqu'il modélise la structure interne d'un produit et il décrit les flux et les interactions entre les composants du produit (Huang et al., 2007). L'IBD nous permettra d'analyser la circulation des différents flux de l'entrée au produit jusqu'à la sortie en passant par les composants concernés. Une fois ce diagramme établi, on pourra déterminer l'impact de chaque mode de défaillance sur la fonction principale du produit. La liste des modes de défaillances se construit à partir des observations

des produits retournés à l'atelier de remanufacturing et la documentation du produit créée par le fabricant original. Le diagramme IBD nous permettra d'analyser les possibles effets de chaque défaillance, en étudiant les potentielles ruptures des différents flux de l'entrée du système à sa sortie en passant par l'ensemble des composants. Ensuite, tableau 3 (cas d'étude) est proposé pour rapporter les modes de défaillance de chaque composant et de chaque connexion de ces composants ainsi que les effets de leurs défaillances sur les fonctions du produit.

3.3.1.3 Identification des symptômes potentiels du produit

Cette étape a pour but d'identifier les symptômes potentiels des produits retournés. Il est important d'identifier et de cerner les symptômes des produits retournés puisqu'ils sont les premiers éléments observables lors du diagnostic. Les symptômes portent sur les aspects esthétiques et fonctionnels du produit retourné, et ils consistent à observer : si le produit est en état de marche ou non ? Dans l'affirmatif, il faut se poser la question dans quel état le produit fonctionne (bruit, température, vibrations, etc.) ?

L'identification des symptômes potentiels reposent sur deux sources d'informations. La plus importante étape se tient lors des séances pré-projets, en examinant les conditions d'un grand nombre de produits retournés, ce qui permettra de fournir une première liste des symptômes, cette liste peut être complétée plus tard dans l'avancement du projet à l'apparition de nouveaux symptômes. La deuxième source d'information qui permet d'enrichir cette liste est les informations de la documentation issue du fabricant original.

Dans le développement du processus de diagnostic, cette étape sert également, à comparer, à vérifier et à compléter les effets des modes de défaillances obtenus dans l'étape précédente avec les symptômes observés en atelier de remanufacturing.

3.3.1.4 Indices de priorité de risque (IPR)

L'indice de priorité de risque est un indice d'évaluation numérique du risque attribué à un produit ou à un processus dans le cadre de l'AMDEC. L'équipe attribue à chaque mode de défaillance des valeurs numériques qui quantifient la probabilité de son occurrence, la probabilité de sa détection et la gravité de son impact. L'IPR s'obtient grâce à la multiplication de ces trois paramètres. A mesure que le risque augmente, la valeur de l'IPR augmente.

La **gravité** renvoie à l'ampleur de l'effet final d'une défaillance. Plus les conséquences sont graves, plus la valeur de la gravité est élevée. L'**occurrence** fait référence à la fréquence à

laquelle une cause fondamentale est susceptible de se produire, décrite qualitativement sur une échelle allant d'un événement peu fréquent à trop fréquent. La **détection** fait référence à la probabilité de détecter une cause fondamentale avant qu'une défaillance puisse se produire (Arabian-Hoseynabadi et al., 2010). Ces paramètres sont individuellement évalués en utilisant une échelle numérique de 1 à 10. En fonction des normes appliquées, cette échelle peut changer d'amplitude (de 1 à 100 par exemple) mais pour toutes les normes une valeur élevée représente un faible score, par exemple, impossible à détecter pour le paramètre détection ou très fréquent pour le paramètre d'occurrence, etc. Toutefois, dès qu'une norme est choisie, elle doit être respectée le long de l'AMDEC.

L'IPR modifié nous servira dans l'élaboration de la procédure de diagnostic des produits en FdV. Il sert, d'une part, à l'association des symptômes et les modes de défaillances et d'une autre part, il sert à la hiérarchisation des modes de défaillances. Une hiérarchisation qui permettra de prioriser le diagnostic des modes de défaillances les plus fortement probables.

Pour adapter l'usage de l'IPR à notre objectif d'élaboration de procédure de diagnostic nous proposerons une nouvelle interprétation des résultats de calcul de l'IPR dans ce nouveau cadre. L'IPR dans le cas de l'AMDEC adapté au remanufacturing devient un indicateur de priorisation des modes de défaillances et d'associations de ces derniers aux symptômes. L'IPR permettra d'élaborer une grille de diagnostic. Grâce à l'IPR, nous cherchons à cibler les éléments à diagnostiquer en priorité. Par-là, nous voulons obtenir un gain de temps et de coût dans la phase de diagnostic qui est d'habitude une étape chronophage du processus du remanufacturing. Tout d'abord, on distingue entre deux types de processus de remanufacturing :

- Un processus de remanufacturing où les produits retournés subissent systématiquement, à leur arrivée, un désassemblage total et ensuite les composants sont diagnostiqués un par un.
- Un processus de remanufacturing où le diagnostic se fait sur le produit retourné en entier pour évaluer son potentiel de réutilisation directe, de réparation ou de remanufacturing de ses composants.

Tenant compte de la principale caractéristique de l'entreprise à l'étude, une entreprise non-industrielle, nous estimons que le deuxième type de processus de remanufacturing s'avère moins coûteux et plus adapté pour ce type d'entreprise. Plusieurs produits retournés peuvent avoir un très bon état, ainsi, ils peuvent être réutilisés directement après nettoyage et validation des fonctions principales et esthétiques du produit. Par conséquent et afin d'obtenir des gains

de temps et de coûts, la procédure de diagnostic doit permettre de reconnaître ces produits le plus tôt possible dans la phase d'inspection. Cette phase d'inspection s'appuie sur la méthode d'AMDEC adaptée qui permet d'indiquer les composants qui doivent être inspectés en premier, des plus critiques au moins critiques. Au fur et à mesure du diagnostic, les modes de défaillances du produit retourné sont identifiés et il serait possible de savoir si le produit peut être réutilisé, réparé ou nécessite un remanufacturing complet. Au cas où le produit n'est pas réutilisable en entier, la méthode guide les techniciens au désassemblage et le diagnostic des composants restants.

Les étapes précédentes du modèle permettent d'identifier les possibles modes de défaillances et les potentiels symptômes liés. Toutefois, la procédure de diagnostic doit, d'une part, permettre de mettre en lien les modes des défaillances identifiés et les symptômes que peut manifester le produit et d'autre part, elle doit permettre la priorisation du diagnostic des défaillances les plus critiques. Cette priorisation définira l'ordonnement des séquences de la procédure de diagnostic. Pour définir un ordre de priorité des défaillances en diagnostic nous servirons des paramètres de l'IPR. Pour chaque mode de défaillance on lui associera trois indicateurs, qui sont les trois paramètres de l'IPR de l'AMDEC, Gravité, Occurrence et Détection.

L'indicateur de gravité révélera comment le mode de défaillance affectera les fonctions du produit, c-à-d, un arrêt total du produit, un mauvais démarrage, des bruits, etc. Ces derniers ne sont que des possibles symptômes, parmi d'autres, que le produit retourné peut manifester. La gravité de chaque défaillance est évaluée dans une échelle de 1 jusqu'au nombre de symptômes. Une défaillance peut avoir plusieurs indicateurs de gravité du moment où cette défaillance a plusieurs symptômes sur le produit.

La probabilité d'occurrence permettra la priorisation des composants à inspecter grâce aux données existant sur l'apparition des défaillances. La détection montre la facilité de détecter une défaillance. Afin de minimiser le coût et le temps nous proposons d'inspecter les défaillances les plus facilement détectables. De ce fait, nous proposons deux indicateurs d'IPR, le premier, IPR1, est associé à la gravité et qui permet de mettre en lien les symptômes avec les défaillances. Quant au l'IPR2 défini par le produit de l'occurrence et la détection permet de prioriser les défaillances à diagnostiquer en premier.

Formules de calcul des indicateurs IPR1 et IPR2 :

$$IPR1 = Gra \quad Et \quad IPR2 = Occ \times Det$$

3.3.1.5 Elaboration de la grille de diagnostic

Cette dernière étape consiste en l'élaboration de la grille de diagnostic du produit en FdV. Grâce aux indicateurs de gravité, d'occurrence et de détection, il est possible d'associer les modes de défaillances et les symptômes observés dans le produit retourné. Il est également possible d'hierarchiser les modes de défaillances en fonction de leur priorité de risque. Cette étape est la résultante des informations obtenues des précédentes étapes et elle permet de schématiser toutes ces informations pour qu'elles soient lisibles et faciles d'accès aux opérateurs de diagnostic. Dans le cas d'étude, on exposera un exemple de la grille de diagnostic.

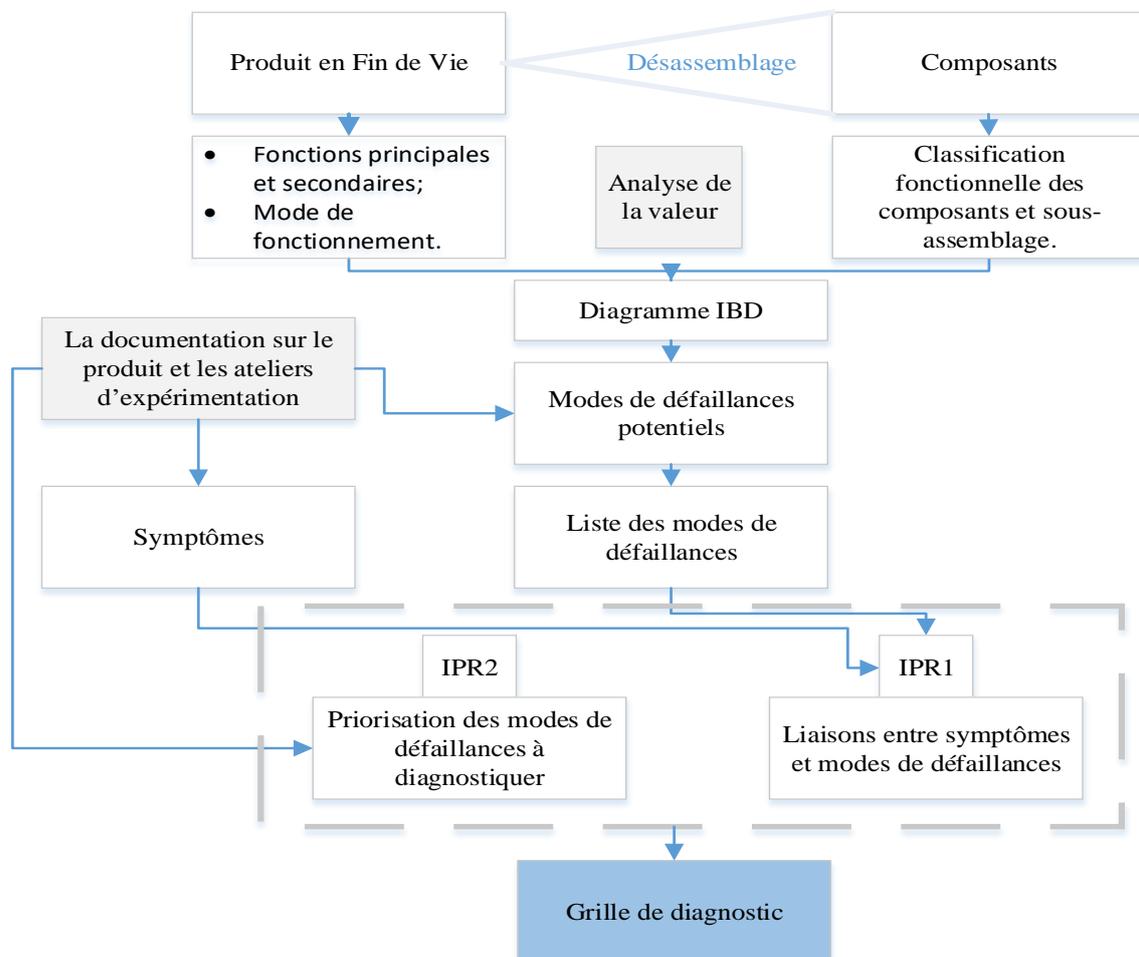


Figure 9 : Synthèse de la méthode AMDEC pour les produits à remanifester.

3.4 Cas d'étude : Compresseur HP80

Dans cette partie nous mettrons en application la méthode D'AMDEC adaptée au remanufacturing sur le cas de l'entreprise Aqua qui souhaite lancer en remanufacturing un compresseur d'air HP 80. L'objectif final de l'application de l'outil est d'élaborer une grille de diagnostic de ce produit en FdV. Cet objectif final s'obtient tout en permettant à l'entreprise et

à ses opérateurs précisément, d'acquérir la connaissance technique autour du fonctionnement du produit à remanufacturer. Nous procéderons dans la suite, par la mise en application directe des étapes de la méthode proposée.

3.4.1 Description du produit et analyse des composants

Cette étape de l'AMDEC pour le remanufacturing consiste en l'explicitation du fonctionnement du produit. Dans cette étape, on se sert des outils de l'analyse de la valeur.

Tableau 3 : Description générale du produit

| | |
|---|--|
| Fonction principale du produit | Fournir de l'air comprimé |
| Fonctions secondaires | N'émet pas de bruit en fonctionnement, N'émet pas de vibrations en fonctionnement |
| Principe de fonctionnement | Ce type de compresseur est désigné par l'appellation 'compresseur-diaphragme'. Il s'agit d'un compresseur sans lubrifiant qui transforme l'énergie électrique et l'air atmosphérique en un air comprimé. L'électro-aimant transforme l'électricité en un champ magnétique qui induit au kit aimant un mouvement rectiligne et cyclique, à son tour, il comprime l'air dans le bloc diaphragme. |
| Matériaux du produit et conditions d'usage | Acier et plastique. Peut fonctionner normalement dans des conditions très humides |

- **Analyse des composants**

Le recensement des composants du compresseur, après désassemblage, donne la nomenclature, Annexe I.1. La nomenclature comprend la liste des composants, leur nombre d'unité et leur codage interne.

- **Classification fonctionnelle**

La classification fonctionnelle des composants permet de regrouper les composants en sous-assemblages ou sous-systèmes qui constituent le produit.

Structure : elle comprend tous les composants du cadre du compresseur et d'autres composants qui préviennent les fuites d'air, atténuent les vibrations ou garantissent une isolation sonore.

Unité d'alimentation en énergie : Tous les composants qui participent à l'alimentation du système en électricité.

Unité de compression : l'ensemble des composants qui agissent directement sur l'air entré en le comprimant.

Unité d'entraînement : Il s'agit du sous-système mécanique qui permet à l'unité de compression le mouvement nécessaire pour comprimer l'air.

Unité du flux : tous les composants qui permettent la circulation du flux d'air dans le compresseur.

L'unité de sécurité : il s'agit de l'unité qui commande les actions de sécurité nécessaire pour l'arrêt du compresseur afin de protéger l'utilisateur et le compresseur ainsi que les systèmes extérieurs en lien avec le compresseur des dommages.

Le tableau 4 représente la classification fonctionnelle des composants. On peut trouver à quel sous-système est associé chaque composant et ses fonctions (tableau 4 comme exemple, le tableau complet est en annexe I.2).

Tableau 4: Classification fonctionnelle des sous-ensembles du compresseur d'air HP80.

| Composant | Code | Sous-système | Fonctions | Commentaire |
|------------------------------------|------|-----------------------------------|--|--|
| Boitier avec orifice d'échappement | BH-0 | Structure | Collecter et guider l'air vers l'orifice | Doit résister à la pression, doit être isolé (pas de fuite d'air) et doit permettre un écoulement fluide de l'air compressé. |
| Joint d'étanchéité | BH-1 | Structure | Empêcher les fuites entre le boitier supérieur et le boitier inférieur | – |
| Alimentation électrique | W-1 | Système d'alimentation en énergie | Alimenter le système en courant continue. | – |

Les informations contenues dans le tableau 4 sont utiles dans l'identification des modes de défaillances potentiels. Pour connaître les modes de défaillances de chaque composant, il est

primordial de connaître son fonctionnement normal détaillé dans les fonctions de chaque composant.

3.4.2 Analyse des modes de défaillances potentiels

Comme expliqué, plus tôt, cette étape permet de définir tous les modes de défaillances potentiels. Cette partie de l'analyse passe par trois sous-étapes. La réalisation de l'IBD, puis l'analyse des ruptures potentielles des flux et finalement le tableau des modes de défaillances.

La Figure 10 montre le diagramme d'IBD du compresseur. Comme expliqué auparavant, l'IBD permettra d'illustrer comment les sous-systèmes du compresseur interagissent entre eux et de montrer la circulation des flux d'entrées jusqu'à la sortie au contact des différents sous-systèmes. L'IBD nous permettra d'étudier le fonctionnement du produit et les relations entre les composants. Ceci, permettra une analyse des interruptions possibles des flux, composant par composant, de l'entrée des flux jusqu'à la sortie des flux. Ces différentes interruptions observées seront exprimées en modes de défaillances potentiels.

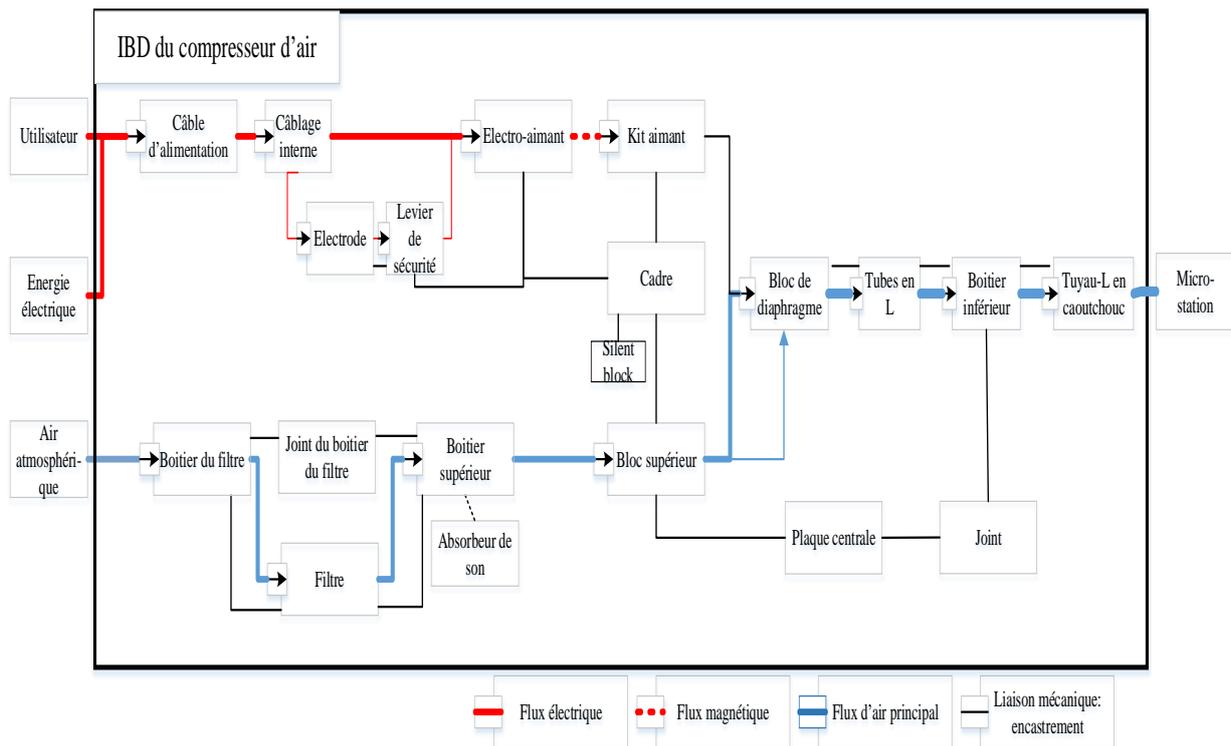


Figure 10: Diagramme IBD du compresseur HP80.

Comme on peut observer dans la Figure 10, on définit deux types de flux entre composants, un flux principal et un flux secondaire. Le flux principal, ou le chemin principal (le plus large sur la Figure 10) est le cheminement des flux à l'entrée du système. Le flux principal peut être un des flux électriques, mécaniques, pneumatiques ou magnétiques ou une combinaison de ces

flux. Afin que le produit réalise pleinement sa fonction, il est nécessaire que le flux principal circule correctement sans interruption. Toute interruption du flux principal est signe de dysfonctionnement du produit. Dans notre cas, il existe deux flux principaux provenant des entrées du système et qui se rejoignent au niveau du ‘diaphragme’ pour fournir un flux de sortie qui délivre ‘air comprimé en sortie’. Ceci implique qu’en cas d’interruption d’un des flux principaux, le flux de sortie sera également interrompu.

De l’autre côté, les flux secondaires sont les flux en boucle qui circulent uniquement entre des composants internes et qui peuvent potentiellement affectés les flux principaux.

Après la réalisation de l’IBD, une séance remue-méninge s’organise dans laquelle est explorée l’ensemble des interruptions potentielles, à la fois au niveau des composants comme au niveau des flux. Le processus de détermination des interruptions consiste à suivre les flux de l’entrée et de s’arrêter sur chaque composant pour ressortir les dysfonctionnements qui peuvent causer l’interruption des flux. Les dysfonctionnements obtenus sont les modes de défaillances potentiels du produit.

L’analyse des modes de défaillances, se termine avec un tableau regroupant tous les modes de défaillances possibles et leurs effets sur les fonctions du produit. Avant transcription du tableau des modes de défaillances et leurs effets, il est utile de croiser les résultats issus de l’étape précédente avec les données des modes de défaillances récoltées à partir de la documentation du fabricant et les séances pré-projets d’étude des produits en FdV. Après vérification des résultats, (tableau 5 comme exemple, le tableau complet, en annexe I.3, regroupe les modes de défaillances et leurs effets).

Tableau 5 : Rapport des modes de défaillances.

| Numéro du mode de défaillance | Type d’élément | Type/Composant | Mode de défaillance | Effet | Effet sur le flux principal |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1 | Entrée du système | manuel | Le câble n’est pas branché | Pas de démarrage du compresseur | Interruption totale |
| 2 | Entrée du système | électrique | Pas de courant au secteur. | Pas de démarrage | Interruption totale |

| | | | | | |
|---|-----------|------------------------|------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| | | | Prise de courant endommagée. | du compresseur | |
| 3 | Composant | Système d'alimentation | Câble coupé. | Pas de démarrage du compresseur | Interruption totale |
| | | | Les fils sont corrodés | Courant électrique plus faible | Interruption partielle |

3.4.3 Identification des symptômes possibles

L'identification des symptômes possibles s'obtient suite aux observations de l'état des produits retournés dans l'atelier de remanufacturing.

Dans le tableau 6, on trouve les observations enregistrées des symptômes d'une dizaine de compresseurs en FdV, diagnostiqués à leur arrivée à l'atelier de remanufacturing. Cette liste de symptômes vient compléter les informations élaborées lors des séances remue-méninge, précédemment détaillées.

Tableau 6 : Symptômes du compresseur HP80.

| Symptômes | Description |
|--|--|
| Pas de démarrage du compresseur | Le compresseur démarre au branchement du câble. Si au branchement aucun bruit ne vient du compresseur c'est qu'il n'a pas démarré. |
| Démarrage mais absence ou faible pression de l'air | Le compresseur démarre mais une faible ou absence d'air à la sortie. La pression d'air doit être à 200mbar. un manomètre (pas avec le produit) est utilisé pour vérifier la pression d'air à la sortie |
| Compresseur démarre mais avec bruit et vibrations | Présence de bruit et de vibrations plus excessifs que ceux normaux de l'ouverture et de la fermeture des valves à l'intérieur du compresseur. |

3.4.4 Calcul de l'indice de priorité des risques

Dans ce paragraphe nous montrerons, sur notre cas d'étude, le calcul de l'indice de priorité des risques.

La **gravité** porte sur les symptômes observés. On associe à chaque mode de défaillances un ou plusieurs degrés de sévérité en fonction du nombre des effets que cause ce mode de défaillance. Ces informations sont répertoriées dans le tableau 7. Pour la **gravité** on attribue des valeurs de 1,2 ou 3. La valeur de 1 pour une très faible gravité et la valeur de 3 pour une très haute gravité.

La probabilité d'**occurrence** d'un mode de défaillance doit se baser sur les données numériques collectées à partir du diagnostic des produits en FdV. Toutefois, en début de projet de remanufacturing, le nombre de produit en FdV collecté peut ne pas être significatif. Dans ce cas, il est possible d'établir une échelle qualitative de la probabilité d'occurrence d'un mode de défaillance, basé sur l'expérience des techniciens, les premières données du terrain et les connaissances théoriques d'ingénierie. L'échelle va de 1 à 10. Avec 1 une très faible probabilité et 10 une très forte probabilité.

Les valeurs de l'indice de **détection** du mode de défaillance se définissent de la même façon que pour la probabilité d'occurrence. Dans une échelle de 1 à 10, avec 1 comme une très faible détectabilité et 10 une très forte détectabilité.

L'IPR1 et l'IPR2 sont calculés comme indiqué antérieurement. Le calcul de l'IPR nécessite la pondération de la GRA pour avoir le même poids des autres indices intervenant dans le calcul de l'IPR. Ce dernier peut servir, ultérieurement, dans l'étude de la qualité et de la fiabilité de ces produits remanufacturés.

Le tableau 7 présente les indices de priorité des risques pour chaque mode de défaillance identifié, (le tableau complet est en annexe I.4). A partir des indicateurs de l'IPR1 et l'IPR2, on élaborera dans la suite l'arbre de diagnostic des compresseurs en FdV.

Tableau 7 : Calcul des Indices de Priorité du Risque

| Num | Gra | Occ | Det | IPR1 | IPR2 | Gra* | IPR |
|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|
| 1 | 3 | 8 | 8 | 3 | 64 | 10 | 640 |
| 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 10 | 20 |
| | 3 | 2 | 5 | 3 | 10 | 10 | 100 |
| 3 | 3 | 4 | 5 | 3 | 20 | 10 | 200 |

3.4.5 La grille de diagnostic

La dernière étape consiste en l'élaboration de l'arbre de diagnostic des compresseurs en FdV. Dans la première colonne à gauche, Figure 11, on met tous les symptômes identifiés. Puis, dans

la deuxième colonne on met les modes de défaillances associés à chaque symptôme. Ces associations ont été déterminées grâce à l'IPR1. En troisième colonne vient les éléments à vérifier pour s'assurer de l'existence ou non du mode de défaillance. En dernier, les actions à conduire pour éliminer ces modes de défaillances.

La procédure du diagnostic par l'opérateur consiste à repérer les symptômes du produit, puis, en se basant sur l'arbre de diagnostic, de sélectionner les modes de défaillances associés, ensuite, observer les composants concernés et agir sur ces derniers.

La Figure 11 représente une partie de la grille de diagnostic (pour la grille complète, voir l'annexe I.6). Cet arbre de diagnostic est le résultat recherché par le déploiement de la méthode AMDEC modifié pour le remanufacturing.

| SYMPTOME | DIAGNOSTIC | | CORRECTION |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| | DEFAILLANCE | Elément à vérifier | |
| COMPRESSEUR NE DEMARRE PAS | Kit aimant courbé ou usé | Vérifier la surface et la rectitude | Réparer/remplacer le kit aimant |
| | Compresseur n'est pas branché | Prise de courant | Brancher le compresseur |
| | Système de sécurité activé | Vérification visuelle | Retourner à la position correcte |

Figure 11 : Grille de diagnostic pour le compresseur HP80.

3.5 Conclusion

La méthode proposée pour le diagnostic des produits en FdV est une adaptation de la méthode AMDEC pour le remanufacturing. L'AMDEC nous a permis de recenser systématiquement tous les modes de défaillances possibles et d'élaborer, grâce aux indicateurs de l'AMDEC, une grille de diagnostic plus rapide et facile d'exécution par les opérateurs du remanufacturing. Nous avons illustré l'application de la méthode développée par un cas d'étude sur le compresseur d'air de l'entreprise Aqua. Les modes de défaillances obtenus grâce à la grille de diagnostic sont une première étape de conception du processus de remanufacturing. Ceci, après définition des actions qui permettront de supprimer les modes de défaillances et de remettre les produits en état de neuf.

Chapitre 4. La re-conception des composants pour la fabrication additive en remanufacturing.

4.1 Introduction

En fin d'usage, les composants finissent avec plusieurs modes de défaillances. Ces modes de défaillances se manifestent différemment d'un composant à un autre. Le remanufacturing de ces composants nécessite l'introduction de technologies de production capables d'absorber la variabilité des modes de défaillances en fin d'usage des composants. Par la liberté de fabrication qu'offre la fabrication additive (F.A), les composants peuvent être remanufacturés, par ajout de matière sur les zones d'usure ou peuvent être re-fabriqués entièrement en dehors de la chaîne de valeur initiale. Toutefois, il est nécessaire de développer une démarche de l'usage de la fabrication additive, pour sélectionner les composants compatibles avec le remanufacturing par F.A., pour redéfinir les caractéristiques initiales du composant et le reconcevoir pour qu'il soit remanufacturable par F.A.

4.2 La fabrication additive en remanufacturing

Le terme de fabrication additive contient une large catégorie de technologies de fabrication. Il englobe toutes les technologies qui construisent des objets en 3D couche par couche à partir d'un modèle CAO. Selon l'ASTM F42, le comité technique responsable du développement des standards de la fabrication additive, la fabrication additive est « Un processus de jointure de matériaux pour fabriquer des objets à partir de données de modèle 3D, couche par couche, par opposition à des technologies de fabrication soustractives » (ASTM, 2012). L'ISO/ASTM52900-15 définit sept types de procédés de fabrication additive : 1) Projection de liant, 2) Dépôt de matière sous énergie concentrée, 3) Extrusion de matière, 4) Projection de matière, 5) Fusion sur lit de poudre, 6) Stratification de couches, 7) Photo-polymérisation en cuve. Les différences qui existent entre cette variété de méthodes de fabrication additive sont au niveau : des matériaux de base, de leurs formes initiales, de la technique de fabrication d'une couche ainsi que le moyen de liaison entre une couche et une autre (Obaton et al., 2015)

Ces procédés présentent des niveaux de performance différents, dépendants de plusieurs caractéristiques ; types et gammes de matériau, niveau de précision, qualité de finition, nécessité de supports, facilité à réaliser des volumes creux, volumes piégés, nécessité d'étapes de post-traitements et temps d'exécution.

De tous les procédés de la F.A, on trouve principalement dans la littérature deux procédés, le Dépôt de matière sous énergie concentrée (Direct Energy Deposition, DED) et la Fusion sur lit de poudre (Powder Bed Fusion PBF) qui sont utilisés dans la réparation, le reconditionnement et le remanufacturing (Leino et al., 2016). Dans la littérature scientifique

qui porte sur l'implication des technologies de fabrication additive dans les stratégies de boucles de l'économie circulaire (réparation, reconditionnement et remanufacturing), on trouve une forte utilisation du DED. La technologie de DED est considérée comme une technologie convenable pour les processus de remanufacturing. L'utilisation exclusive de ces deux procédés, encore moins pour la PBF, peut s'expliquer par le degré de maturité d'industrialisation qu'ont atteint ces deux procédés. De plus, ces deux procédés permettent, actuellement, d'obtenir des pièces presque similaires aux pièces réalisées par les procédés de fabrication conventionnelle. Il s'agit également de procédés dotés d'une large gamme de matériaux et peuvent fabriquer des pièces de grandes dimensions. En outre, le DED possède un avantage de liberté de fabrication puisqu'il permet de commencer la production sur des surfaces non-planes. Cet avantage lui permet d'être pratique dans les processus de remanufacturing, pour réparer, modifier et reproduire directement les pièces par dépôt direct de matière. A ces deux procédés s'ajoute, mais d'une façon moindre, l'extrusion de matière pour la re-fabrication des nouvelles pièces (Rahito et al., 2019).

Dans la suite, nous expliciterons uniquement le principe de fonctionnement des trois procédés de F.A, le Dépôt de matière sous énergie concentrée (DED), la Fusion sur lit de poudre (PBF) et l'extrusion de matière par le dépôt de fil fondu (Fused Deposition Modeling, FDM). Les deux premières technologies pour l'intérêt particulier qu'elles offrent dans le remanufacturing par l'ajout direct de matière sur un substrat (un composant existant). Un avantage qui permet de revêtir et de reconstituer les surfaces endommagées des composants (Wilson et al., 2014), mais aussi de repurposer des produits par l'ajout de nouvelles formes et de fonctionnalités (Le et al., 2017). Quant au DFF, on l'étudiera pour son avantage, pour les indépendant-R, de Remanufacturer indépendamment de la chaîne de valeur initiale, où la chaîne logistique est compliquée et engage des coûts économiques et environnementaux supplémentaires, tel que le cas chez le type de Remanufacturer à l'étude.

Toutefois, un tableau qui regroupe les différentes catégories de procédés de la fabrication et qui décrit le principe de fonctionnement de chacun des procédés, tel qu'ils sont définis dans la norme NF ISO 17296-2, est en annexe II.1.

4.3 Les technologies de Fabrication Additive et économie circulaire

4.3.1 Fusion sur lit de poudre

Ce type de procédé permet la solidification de poudre sous l'action d'une source d'énergie, laser ou faisceau d'électrons, de moyenne à forte puissance. Cette source d'énergie est reflétée

par des miroirs oscillants qui sont commandés par les données de la CAO. La source d'énergie est projetée sur la surface de poudre qui est tenue par la plateforme, afin de fritter et solidifier la poudre. Ces machines sont dotées de goulottes qui alimentent en poudre après chaque solidification d'une couche, ainsi qu'un système d'égalisation permettant d'étaler et de compacter fortement la poudre déposée.

Globalement la fabrication d'une pièce par ce type de procédé suit les étapes suivantes :

- Une couche d'une certaine épaisseur, généralement de 0.1mm, est étalée sur la plateforme,
- Chauffage et maintien de la poudre à une température faiblement inférieure au point de fusion de la poudre, de façon qu'il suffit que la chaleur de la source d'énergie augmente la température pour provoquer la fusion,
- Fusion de la poudre par balayage de la source d'énergie sur le lit de poudre suivant les données de la CAO. Ainsi, la première couche est réalisée,
- Descente du lit de poudre d'une épaisseur de couche,
- Alimentation et égalisation d'une nouvelle couche de poudre,
- Ainsi de suite, les étapes précédentes sont répétées jusqu'à ce que la pièce soit créée,

Toutefois, une étape de post-traitement reste nécessaire pour enlever la poudre non fritté.

4.3.1.1 Avantages et limites de la Fusion sur lit de poudre

Le procédé PBF a l'avantage de permettre plus de liberté de géométrie ainsi que de créer des pièces de formes et de structures internes complexes, pièces en forme de treillis, volumes creux et des cavités internes. Ce procédé permet de fabriquer des pièces de matériaux quasi-identiques à ceux utilisés en fabrication conventionnelle (Barlier and Bernard, 2015). Grâce au fonctionnement en haute température permettant de fusionner totalement les grains, la Fusion sur lit de poudre fabrique des pièces de bonnes caractéristiques mécaniques, proches des pièces obtenues en fonderie par exemple. Toutefois, pour éliminer les contraintes et les déformations thermiques, il est nécessaire d'effectuer des étapes de traitements thermiques (Vayre et al., 2012). En dépit de la large gamme de matériaux de pièces que cette technologie peut fabriquer, l'ajout de différents matériaux dans une seule pièce peut induire des risques supplémentaires de fissuration et de distorsions. (Hinojos et al., 2016).

4.3.1.2 Applications pour les boucles de l'économie circulaire

Plusieurs recherches ont étudié le développement du procédé PBF et les propriétés mécaniques de ses pièces. Néanmoins, peu de travaux traitent l'application de cette technique dans les stratégies de l'économie circulaire. Même si ce procédé permet également de transformer une pièce en fin de vie en une nouvelle pièce sans passer par la récupération des matériaux. (Mandil et al., 2016) démontre la faisabilité technique de l'ajout de nouvelles formes, par ce procédé, sur une pièce existante afin d'obtenir une nouvelle pièce similaire ou différente de la pièce de base. Ceci, en étudiant les propriétés mécaniques et la microstructure de la nouvelle pièce. Cette dernière est fabriquée à partir de l'ajout de matière de titanium Ti-6Al-4V sur un substrat plat considéré en tant que pièce usée en titanium Ti-6Al-4V. En conclusion, le procédé de PBF, permet de réaliser de nouvelles formes sur une pièce existante en obtenant une microstructure et des caractéristiques mécaniques convenables.

(Hinojos et al., 2016) ont étudié la possibilité de réaliser des pièces multi-matériaux (Inconel 718 avec 316L en acier inoxydable) à partir de l'EBM (Electron Beam Manufacturing), une technologie du procédé PBF, pour des utilisations dans le domaine de la fission nucléaire. L'étude était sur la faisabilité de mettre plusieurs matériaux dans la fabrication de nouvelles pièces, et la possibilité d'utiliser ces résultats sur la réparation de pièces composées de matériaux différents a été discutée. Le nombre d'applications du procédé PBF dans les stratégies de récupération des produits en fin de vie, sans passer par le stade de matériaux, reste très limité dans la littérature. Cependant, la réalisation de nouveaux composants pour remplacer ceux en FdV est une possible implication du PBF dans les activités de remanufacturing (Leino et al., 2016). Le peu d'applications de ce procédé dans les processus de remanufacturing, peut être expliqué par la nécessité de surface plane, à l'échelle de l'épaisseur des couches, pour ajouter un nouveau matériau (Matsumoto et al., 2016). De plus, cette technologie reste contrainte par le volume de la machine limitant ainsi le volume de la pièce à traiter.

4.3.2 Dépôt de matière sous énergie concentrée

Ce type de procédé consiste à injecter des poudres dans une source d'énergie concentrée, faisceau laser ou plasma, au niveau de la buse. Ensuite, la matière se dépose fondue, suivant les données de la CAO et grâce au positionnement et à l'orientation multiaxes de la buse, pour former une couche de la pièce. Cette étape, se répète jusqu'à obtention de la pièce. Par la suite, il est nécessaire d'effectuer un usinage de finition des surfaces fonctionnelles.

4.3.2.1 Avantages et limites

Contrairement à la Fusion sur lit de poudre, ce procédé est doté d'une vitesse de fabrication élevée allant jusqu'à 200 cm³/h. Il permet également la réalisation de pièces de plus grandes dimensions que le PBF. Un large choix de matériaux est possible permettant de réaliser des pièces en composant plusieurs matières.

Le procédé de DED a l'avantage de permettre de lancer la fabrication sur des surfaces non planes de pièces déjà existantes, ouvrant ainsi la possibilité à remettre à neuf, re-fabriquer des pièces en FdV et d'en faire des nouvelles. Ceci, en rajoutant de nouvelles parties (formes, surfaces fonctionnelles) ou de nouvelles fonctionnalités, par exemple, ajout d'une couche externe d'un matériau plus résistant à l'usure que le matériau de la pièce.

4.3.2.2 Applications pour les boucles de l'économie circulaire

Grâce aux avantages que le procédé DED offre pour les processus du remanufacturing, plusieurs applications ont été développées dans différents domaines. En s'appuyant sur les techniques de l'ingénierie inverse, (Zhang et al., 2015) réalisent la re-fabrication des composants endommagés d'une pale de turbine. La combinaison des données de mesures géométriques des parties endommagées et les données du modèle CAO permet d'obtenir la trajectoire de dépôt de la matière. La réparation des turbines par le DED s'avère plus avantageuse, d'un point de vue économique et environnemental, que la fabrication d'une nouvelle pièce (Leino et al., 2016). D'autres applications ont été réalisées dans la réparation des moules et matrices permettant de réparer et de prolonger la durée de vie des moules rapidement (Jhavar et al., 2013). La rapidité de réparation a un avantage important pour l'industrie des moules, vu qu'elle est directement liée à des industries de production de masse et le temps de réparation d'un moule est largement inférieur à la production d'un neuf. (Lewis et al., 2015) étudient la réparation des rails de train qui sont sujet à l'usure, généralement sur des zones locales au niveau de l'aiguillage ou du passage, nécessitant auparavant, le changement complet des rails qui peuvent mesurer des centaines de mètres. Ces études ont validé la faisabilité technique du remanufacturing par DED en évaluant les propriétés mécaniques et la microstructure des zones traitées.

4.3.3 Extrusion de matière : Le dépôt de fil fondu (FDM)

Le FDM est la technologie F.A. par extrusion de matière la plus courante (Gibson et al., 2015). Elle permet de faire fondre des matériaux en vrac dans une petite chambre. La matière première, sous forme de fil, est extrudée, ce qui permet un écoulement constant de la matière à

travers une section constante. A la sortie de la buse, le matériau est en un état physique semi-solide. Une fois au contact du matériau précédemment déposé, il se solidifie pour donner une seule structure solide. Le DFF permet de traiter une grande variété de matériaux garantissant des caractéristiques mécaniques satisfaisantes. Les pièces en polymère fabriquées par DFF sont parmi les plus solides pour tout procédé F.A. à base de polymère. Le succès du DFF peut-être expliqué, en partie, par la montée des projets RepRap et l'expiration des brevets sur cette technologie. Les projets RepRap ont favorisé la promotion de l'open source et l'autoréplication de ces imprimantes. Ceci a permis, une réduction drastique des coûts du DFF, la rendant une porte d'entrée accessible pour les entreprises qui découvrent la F.A (AMFG, 2019). Toutefois, le DFF présente des limites relatives à la vitesse de fabrication, à la précision et à la densité de matière. De plus, une forte dépendance existe entre la stratégie de fabrication et les propriétés mécaniques de la pièce imprimée. Le changement d'orientation de la plate-forme de construction et l'épaisseur de la couche, par exemple, conduisent à une nature anisotrope des propriétés des pièces et à des variations en termes de performance mécanique. La technologie FDM intervient en économie circulaire uniquement pour créer de nouvelles pièces et elle ne permet pas de restaurer des pièces en FdV telles que les deux technologies précédentes.



Figure 12 : (A gauche) Remanufacturing d'une aube de turbine par DED. (À droite) Remplacement d'une plaque de joug par DFF.

4.3.4 Conclusion

Globalement, les cas d'utilisation de la fabrication additive pour le remanufacturing sont réalisés sur des pièces caractérisées par des propriétés spécifiques de matériaux, de structures complexes, des pièces fonctionnant dans des milieux sévères (frottement, température) ou plusieurs de ces caractéristiques à la fois. La plupart des articles qui discutent l'utilisation de la fabrication additive pour la restauration et le remanufacturing des pièces en FdV, traitent la faisabilité technique de cette technologie pour des applications précises et des cas indépendants. Ceci, en validant les caractéristiques mécaniques et métallurgiques de l'ajout de matière sur des pièces déjà existantes de différents matériaux. A notre connaissance peu d'études traitent l'usage de la fabrication additive en processus de remanufacturing. Encore moins, les études

sur les méthodes de sélection des composants remanufacturables par F.A et les modèles et démarches de re-conception des composants pour F.A. en remanufacturing.

4.4 Démarche de l'usage de la fabrication additive en remanufacturing

Après avoir exploré les avantages et l'intérêt qu'offre l'intégration de la F.A dans les boucles de l'économie circulaire, nous élaborerons dans la suite la démarche de l'usage de la F.A. en remanufacturing. A partir des cas d'études de remanufacturing des pièces métalliques en FdV. (Rickli et al., 2014) ont proposé un cadre méthodologique de l'usage de la F.A métallique en remanufacturing, Figure 13. Ce cadre comprend un processus de traitement de composant en trois grandes étapes : évaluation de l'état et numérisation, dépôt de matériaux puis traitement et inspection. Une mise en pratique de ce processus a été réalisée sur un composant en acier corrodé.

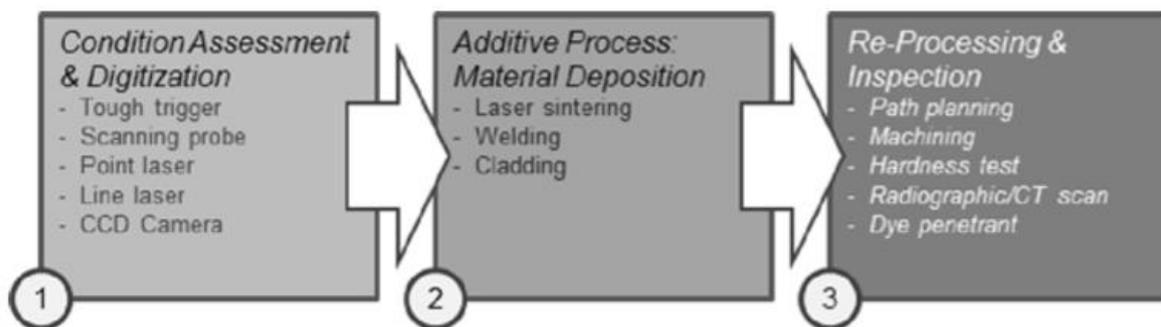


Figure 13 : Les étapes clés du cadre méthodologique de l'usage de la F.A métallique pour le remanufacturing (Rickli et al., 2014).

La démarche qu'on propose s'appuie sur les étapes clés du processus de remanufacturing dans lesquelles la fabrication peut intervenir. Comme on a vu, la fabrication additive intervient en remanufacturing pour deux situations. Dans la première situation, le produit est un substrat et l'ajout de matière se fait directement pour qu'il soit repurposé, en ajoutant de nouvelles formes ou pour traiter et corriger les défauts de matière et les parties usés du substrat. Dans la deuxième situation, la F.A intervient pour refaire complètement le composant indépendamment de la chaîne de valeur initiale de la production de ce dernier (Wits et al., 2016). La première situation gagne un grand intérêt des recherches sur la F.A. en remanufacturing et les études abondent sur les démarches et les cas d'études. Ces études concernent exclusivement les technologies de F.A métalliques, grâce à leurs possibilités d'ajout de matière sur un substrat existant. Toutefois, tenant compte de l'accessibilité des technologies plastiques pour le type de

Remanufacturer de la taille de l'entreprise sous l'étude, nous souhaitons étudier la démarche de réalisation de nouvelles pièces par F.A pour remplacer les pièces en remanufacturing.

La Figure 14 schématise la démarche de l'usage de la F.A dans le processus du remanufacturing.

Dans la suite nous détaillerons les étapes de cette démarche et nous illustrerons l'application de chacune des parties de cette démarche par le cas d'étude de remanufacturing par F.A. d'un composant du compresseur HP80 de l'entreprise à l'étude Aqua.

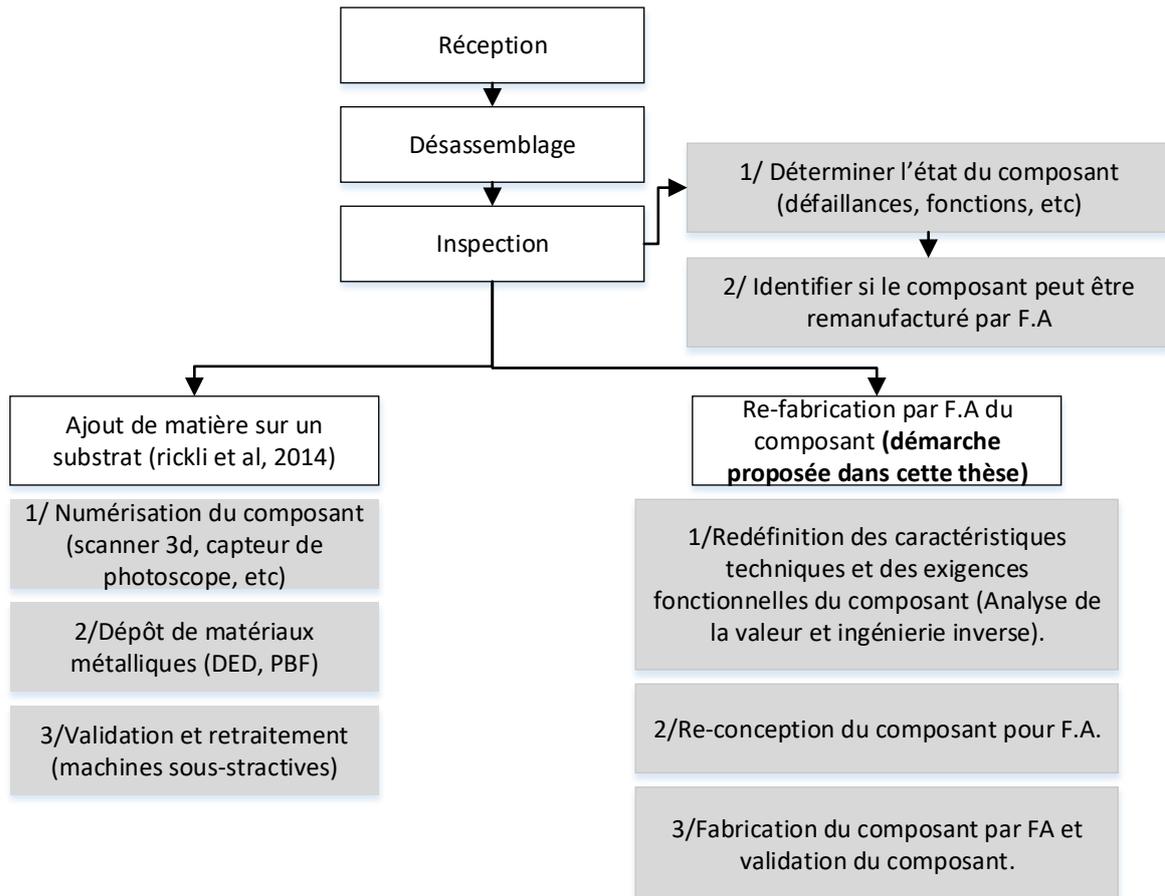


Figure 14: Implications de la F.A dans le processus de remanufacturing.

4.4.1 Identification/Caractérisation des composants pour la F.A. en remanufacturing

Dans le chapitre 1, on a vu que la caractérisation des produits et composants appropriés et préférables pour le processus du remanufacturing, revêt une importance fondamentale dans la littérature sur le remanufacturing. Notamment, l'étude de (Bras and Hammond, 1996) sur le développement de métriques pour l'évaluation de la remanufacturabilité des produits. Pour chaque étape du remanufacturing a été attribuée une métrique permettant d'évaluer la facilité

de son exécution, à savoir, la facilité de désassemblage, la facilité de nettoyage, la facilité d'inspection/de contrôle et la facilité de réassemblage. Dans le même sens, (Sundin, 2004) propose une matrice nommée RemPro-matrix qui montre les propriétés convenables des produits pour chacune des étapes du processus de remanufacturing. La matrice RemPro lie les propriétés des produits et les étapes de remanufacturing pour évaluer la remanufacturabilité des produits et s'en servir comme outil de conception pour le remanufacturing. En général, ces travaux sur la caractérisation des produits remanufacturables dépendent des informations qui remontent du processus de remanufacturing (Zwolinski et al., 2006). Dans ce travail de caractérisation et d'identification des produits remanufacturables par F.A, nous adopterons une approche similaire qui consiste en l'observation des étapes du remanufacturing et de déduire celles directement impliquées par l'intégration de la F.A. Puis, nous définirons les principaux critères qui doivent être pris en considération pour évaluer la possibilité de remanufacturabilité du composant par F.A.

Dans le but de définir les principales caractéristiques des produits à remanufacturer par les technologies de F.A, nous suivons ces étapes :

- Identification des étapes du processus du remanufacturing dans lesquelles la F.A est impliquée.
- Spécification des caractéristiques préférables pour chacune des étapes de remanufacturing par F.A.

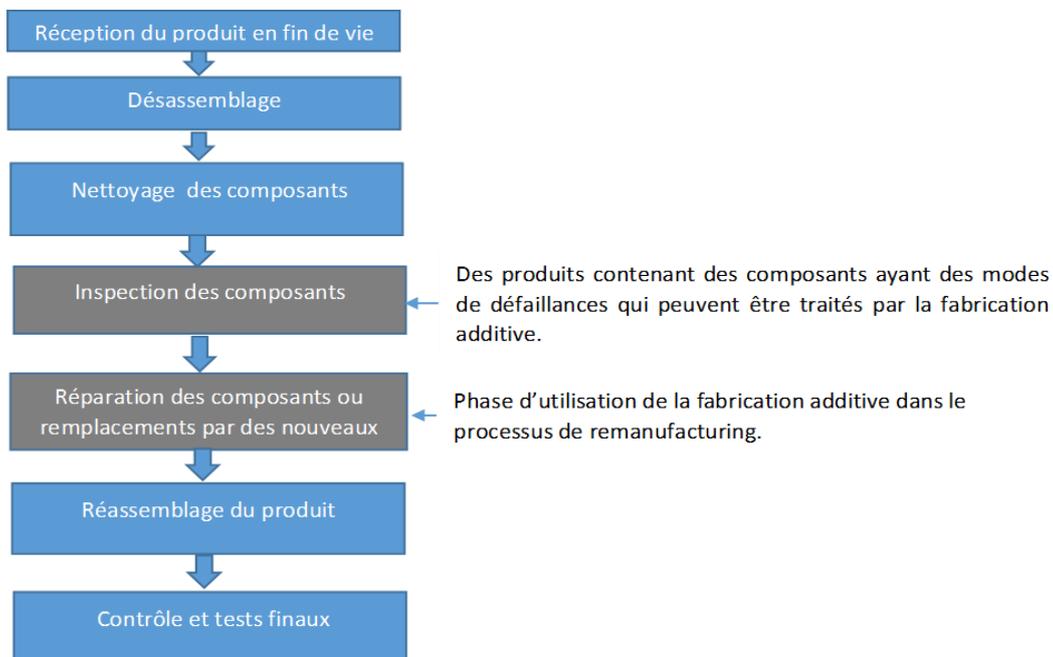


Figure 15: Les étapes où la fabrication additive intervient dans le processus du remanufacturing (Lahrour and Brissaud, 2018)

La F.A peut avoir une implication directe sur le processus de remanufacturing uniquement sur l'étape d'inspection des composants et l'étape de traitement ou de remplacement de ces derniers. Les produits qui peuvent être remanufacturés par F.A. sont globalement sujets à des types d'usures et de défaillances spécifiques (Kamrani, 2014). Figure 15 représente le processus de remanufacturing avec mise en point sur les étapes où la F.A intervient.

Par l'ajout de matière, la F.A est principalement utilisée en remanufacturing pour corriger le volume et les pertes dimensionnelles des composants en FdV. Ainsi, parmi les usures et défaillances couramment traitées par F.A. on trouve : l'abrasion, la corrosion, l'érosion, la fissuration et la cavitation. Par conséquent, les composants ayant une forte probabilité de présenter ce type d'usure en FdV sont de forts candidats pour être remanufacturés par F.A. Pour ceci, nous faisons appel à l'outil d'inspection exhaustive, l'AMDEC pour le remanufacturing qui permettra d'identifier les composants potentiellement sujets à ce type de mode de défaillance. L'inspection a un rôle central dans le processus de remanufacturing, puisqu'elle permet d'identifier les défaillances, de planifier leurs traitements et de produire un nouveau modèle CAO du composant identique à son état en FdV.

Le tableau 8 résume les caractéristiques des produits à remanufacturer par F.A., déduit des études de cas de la littérature et des contraintes du processus de remanufacturing par F.A.

Tableau 8: Caractéristiques des produits remanufacturables par F.A.

| | Phase inspection | Phase de réparation des composants |
|-------------------------------|--|--|
| Caractéristiques des produits | -Une probabilité élevée de modes de défaillances en fin de vie : abrasion, corrosion, érosion, fissure, cavitation. -Facilité à être inspecté par des techniques d'inspection avec et sans contact. | -Facilité d'accès à la région où l'ajout de matière s'effectuera. -La forme de la région où l'ajout de la matière s'effectuera est adaptée à la technologie de fabrication additive. -Matériaux faisable par fabrication additive. |

4.4.2 Redéfinition des exigences fonctionnelles du produit

Après avoir identifié les composants qui peuvent être remanufacturés par F.A, la deuxième étape consiste en la définition des caractéristiques et exigences fonctionnelles à partir du

composant en FdV. En absence de collaboration avec le FEO, les indépendants-R manquent de données sur le produit et ses composants. Pour acquérir ces données essentielles à la re-conception et à la fabrication de remplaçants des composants défectueux par F.A, il est nécessaire d'établir une analyse de valeur et de se servir des outils de l'ingénierie inverse sur le composant en FdV. Cette démarche permet d'obtenir les informations sur les fonctions du composant, son comportement, ses propriétés et les contraintes qu'il subit. La Figure 16 représente la démarche de l'extraction des exigences fonctionnelles du composant en FdV jusqu'à la re-conception du produit pour F.A.

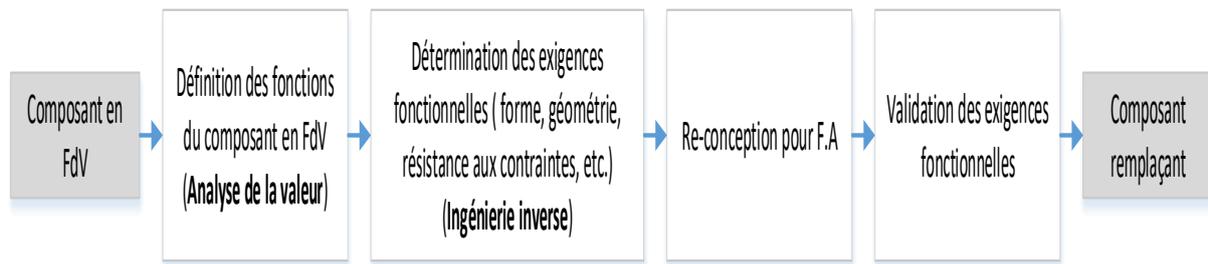


Figure 16 : *Processus de re-conception d'un composant en FdV.*

Pour les pièces mécaniques, les exigences du produit concernent généralement, la géométrie de la pièce et la résistance aux contraintes mécaniques et thermiques, etc. Nous illustrerons notre démarche par la re-conception de la pièce kit aimant.

4.4.2.1 Description des fonctions du composant

Le composant kit aimant est le composant qui permet à la fois de pousser et tirer simultanément et alternativement les deux diaphragmes. Le premier pour comprimer l'air contenu dans le bloc diaphragme et le deuxième pour aspirer l'air dans le deuxième bloc diaphragme. Le kit aimant est composé de deux aimants assemblés par un support plastique. Le kit aimant réalise un mouvement de va et vient grâce au changement périodique du champ magnétique fourni par l'électro-aimant Figure 17.

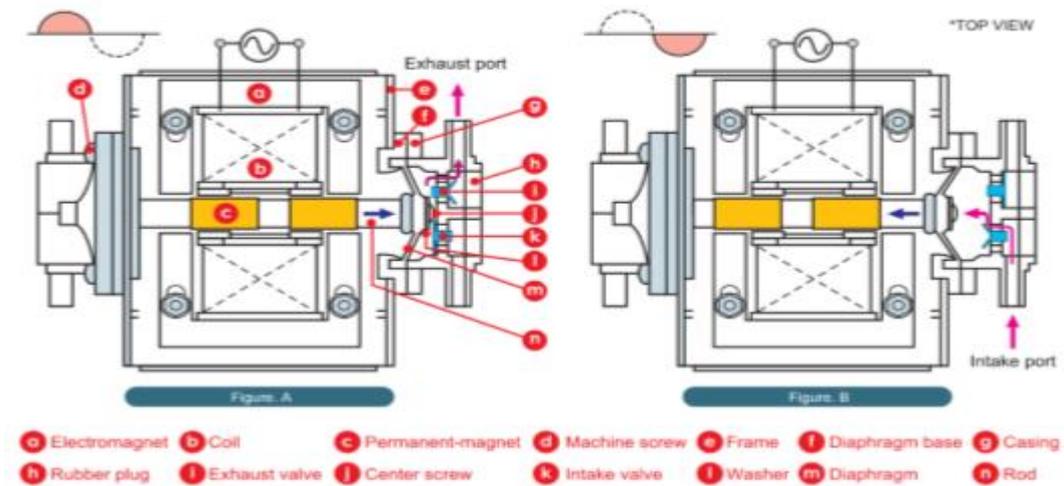


Figure 17 : *Mouvement du kit aimant.*

Le kit aimant se constitue de trois éléments, deux aimants en Neodyme de bore et de deux tiges filetées. L'ensemble est lié par une injection du polymère thermoplastique, Polytétrahydrofur (PTHF).

La durée de vie du kit aimant est estimée à deux ans. Il s'agit de la durée de vie la plus faible des composants du compresseur. Le kit aimant est affecté par plusieurs phénomènes d'usures Figure 18, dont une flexion et une perte de la matière plastique par frottement. La raison de cette usure est expliquée par le fait que les deux diaphragmes perdent leurs rigidités, ce qui met le kit aimant au contact des bords de l'électroaimant et induit des frottements Figure 19. A ceci, s'ajoute le champ magnétique qui génère des contraintes au niveau du cadre en PBT.

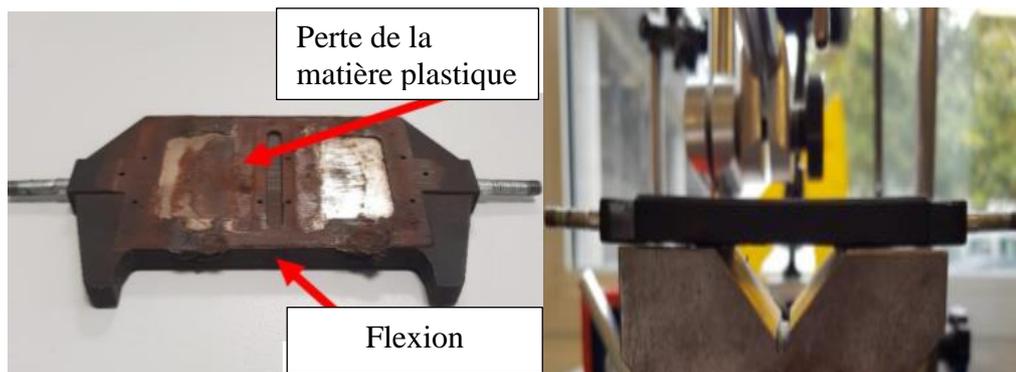


Figure 18 : *(à gauche) Kit aimant en FdV. (à droite) Mesure de la planéité du kit aimant en FdV.*

Nous avons évalué l'ampleur de la flexion en mesurant la planéité de la surface du kit aimant grâce à un comparateur à cadran, Figure 18. Tableau 9 montre les mesures de planéités obtenues sur deux kits aimant en FdV. Des résultats qui confirment les observations visuelles relatives à la flexion du kit aimant.

Tableau 9 : Mesures de planéité de deux aimants en FdV.

| Point | Valeurs pour le kit aimant 1 (10 ⁻³ mm) | Valeurs pour le kit aimant 2 (10 ⁻³ mm) |
|--------------|---|---|
| Max δ | 69 | 69.5 |
| Min δ | 35 | 57.8 |
| Moyenne | 53.8 | 62.8 |
| Ecart type | 10.7 | 4.6 |

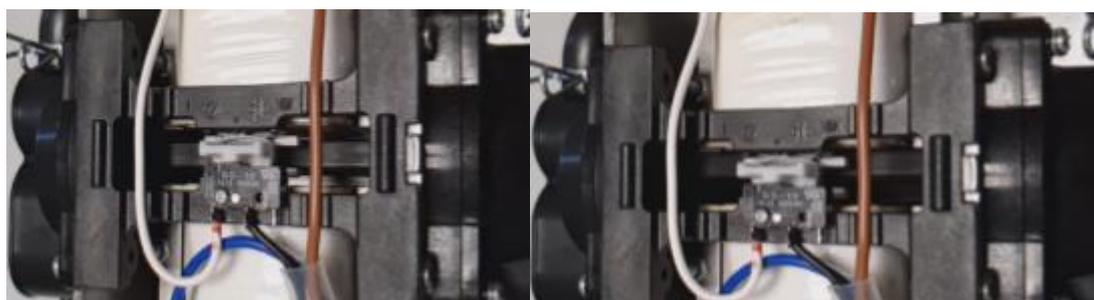


Figure 19 : (à gauche) position normale du kit aimant. (À droite) Contact du kit aimant avec le bord de l'électro-aimant.

A cause de ces phénomènes d'usure, le kit aimant est remplacé une fois sur cinq (d'après les résultats de l'AMDEC, annexe I.5) par un kit aimant neuf en tant que pièce détachée, fourni par le FEO installé aux philippines. Une situation qui implique des coûts environnementaux et économiques supplémentaires. Le remplacement du kit aimant par la pièce détachée rend le résultat économique du remanufacturing du produit non viable voire impossible. D'autant plus que la partie du kit aimant qui subit ces usures est le cadre en plastique, faisant perdre le potentiel d'usage des deux aimants et des deux tiges. Nous estimons que la possibilité de reproduire le cadre du kit aimant en interne chez Aqua débloquera les contraintes économiques et environnementales dues au recours aux pièces de rechange.

Pour les raisons relatives à la nature de l'entreprise (TPE, indépendant-R, manque de connaissance technique), l'intégration et l'appropriation de la technologie de FDM serait plus simple pour ce type d'entreprise (Kianian et al., 2016). Pour ces raisons nous décidons de reproduire le cadre du kit aimant par la technologie de FDM. Il va falloir, également, évaluer le comportement du composant fabriqué en F.A. et le comparer au neuf réalisé par injection dans des conditions réelles de fonctionnement.

4.4.2.2 Détermination des exigences fonctionnelles

Dans cette partie, nous étudierons les forces et contraintes qui entraînent la flexion et l'usure du kit aimant. Les efforts liés aux champs magnétiques sont représentés sur la Figure 20.

- **Friction**

Les efforts induits par les deux électro-aimants responsables du mouvement du kit aimant changent de sens suivant la fréquence d'alimentation électrique. Puisque ces deux efforts ont le même module mais ils sont opposés, ils n'interviennent pas dans la flexion du kit aimant. D'un autre côté, les efforts perpendiculaires au kit aimant (F_2), qui sont dus au champ magnétique créé par le kit aimant et qui mettent ce dernier en interaction magnétique avec les parties métalliques de l'électro-aimant. Toutefois, quand la rigidité des deux diaphragmes faiblit, ces derniers ont une réponse élastique aléatoire, entraînant le kit aimant dans une trajectoire aléatoire le rapprochant d'un des deux électro-aimants. Ce qui impliquera une augmentation de F_2 à cause de la réduction de la distance avec une inclinaison $\alpha(t)$ qui varie suivant le temps Figure 20. Quand $\alpha(t)$ atteint α_{max} le kit aimant bouge au contact de l'électro-aimant, ce qui crée une friction d'un côté du kit aimant responsable de la perte de la matière et des contraintes thermiques sur la partie plastique du kit aimant, Figure 20.

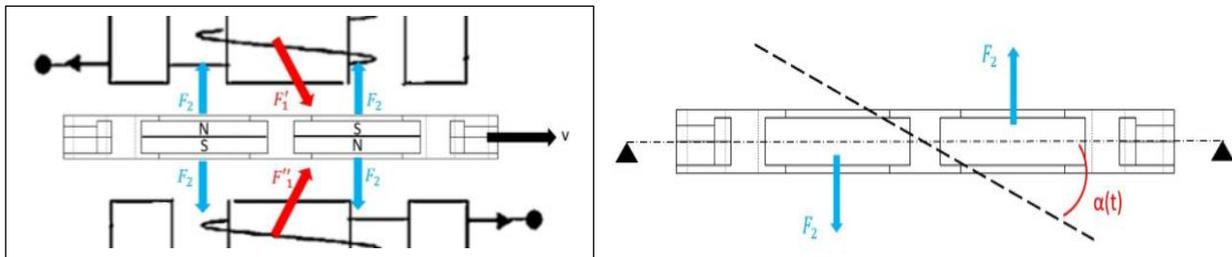


Figure 20 : Les efforts appliqués sur le kit aimant.

- **Courant de Foucault**

Le mouvement alternatif du kit aimant crée un champ électrique circulaire au niveau du kit aimant. Ce champ électrique induit un courant électrique appelé courant de Foucault. Ce courant est responsable de dissipation de chaleur par effet joule, qui pourrait rendre la structure de la partie en plastique (PBT) sensible aux déformations.

- **Moment de la force d'amortissement**

Comme cité précédemment, les propriétés élastiques (la rigidité k) des diaphragmes changent, par conséquent la réponse de l'amortissement le long de la direction x , Kx . A ceci,

s'ajoute l'inclinaison du kit aimant qui implique une rotation de la force d'amortissement entraînant l'apparition d'une composante d'amortissement perpendiculaire Kx_{\perp} Figure 21. Cette composante crée un moment qui s'applique sur l'axe central du kit aimant.



Figure 21 : Effort d'amortissement.

Suite aux efforts mécaniques détaillés, ci-dessus, on peut modéliser les efforts appliqués sur le kit aimant par une flexion 3 points, dans laquelle les efforts extérieurs sont considérés comme la somme des efforts précédemment mentionnés. Selon les théories de la résistance des matériaux (RDM), une poutre de longueur l posée sur deux appuis simples et soumise à un effort concentré P au niveau de son centre. Elle présente un déplacement δ au niveau de son centre exprimé par la formule :

$$\delta = \frac{Pl^3}{48EJ}$$

Avec E est le module de Young et J le moment d'inertie.

De cette formule on peut déduire que le déplacement δ dépend du module de Young et le moment d'inertie. Plus ces derniers sont élevés plus le déplacement est faible.

4.4.2.3 Conclusion de l'étude théorique du composant

La difficulté de cette étude réside dans le fait que nous n'étions pas en possession des données techniques et des spécifications de conception du compresseur. Le modèle proposé est une simplification nécessaire des contraintes et efforts exercés sur le kit aimant. Les aspects importants à considérer dans la re-conception de ce composant pour la F.A sont :

- L'estimation analytique des efforts n'était pas possible vu que les spécifications techniques du compresseur n'étaient pas connues.
- L'effort le plus important appliqué sur le kit aimant est l'effort de flexion, le composant remanufacturé doit répondre à cette contrainte.
- La contrainte thermique impose que le matériau choisi en remanufacturing doit être résistant à la température de fléchissement sous charge.
- Le module de Young E doit être contrôlable en tant que paramètre de conception.
- Les exigences fonctionnelles considérées dans la suite sont : la masse, la forme, la durée de vie, le moment d'inertie, la surface de contact.

Le kit aimant initial est réalisé par injection, est ce que la fabrication additive peut répondre aux mêmes exigences ?

4.4.3 Re-conception du composant pour F.A

Le composant remanufacturé sera réalisé avec DFF. Le DFF présente des performances différentes à celles du moulage par injection. L'une de ces caractéristiques est la possibilité de réaliser une optimisation topologique de la pièce. Toutefois, le peu de données qu'on a pu quantifier sur les efforts extérieurs appliqués sur le kit aimant ne nous permet pas d'élaborer une optimisation topologique du composant. Nous avons décidé de proposer quatre modèles de la pièce et d'observer l'impact des modifications géométriques sur le moment d'inertie J , tout en gardant la même masse et la même forme extérieure du kit aimant. Les modifications apportées à la pièce tiennent compte de la contrainte des liaisons de cette dernière avec le reste de l'assemblage. Par exemple, la largeur du composant ne pouvait être modifiée pour respecter les mêmes jeux initialement établis. A ceci s'ajoute la masse totale et la position du centre de masse du kit aimant qui doivent rester les mêmes pour ne pas influencer le comportement en oscillation du kit aimant.

4.4.3.1 Les prototypes du composant

Après la détermination des exigences fonctionnelles du composant, il est temps maintenant de 'donner corps' à ces exigences et réaliser la pièce par F.A. Pour cela, nous proposons 4 modèles conçus et exportés en fichier STL avec SolidWorks 2019, puis tranchés sur le Z-SUITE logiciel fourni avec la machine Zortrax M200 Plus. D'un modèle à un autre, des modifications géométriques ont eu lieu afin d'améliorer la performance de la pièce tout en respectant les contraintes citées précédemment.

- **Type d'imprimante DFF et matériau**

Pour fabriquer ces prototypes nous avons utilisé la machine Zortrax M200 Plus. Cette machine assure une bonne qualité de précision des pièces. De plus, son écosystème permet une utilisation facile et intuitive pour les utilisateurs débutants, mais également elle peut être personnalisée par et pour les plus expérimentés. Cette qualité, lui permet d'être une solution à la fois pour le prototypage mais aussi pour la production. Les caractéristiques de la Zortrax M200 Plus sont en annexe II.2.

Le choix du matériau pour la DFF dépend du type d'usage de la pièce et des propriétés souhaitées. Les matériaux couramment utilisés en DFF sont : l'acide polyactique (PLA)

comme matériau assez rigide et moins impactant pour l'environnement, le nylon pour les applications légères, le polyéthylène haut densité (HDPE) pour les pièces en contact avec des aliments et l'Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS) comme solution générale pour les pièces dures avec une résistance acceptable (Dawoud et al., 2016). Le PC-ABS est un thermoplastique à fort impact, adéquat pour le prototypage fonctionnel, l'outillage et la fabrication à faible volume. Il détient à la fois les qualités du PC et de l'ABS. Le Polycarbonate (PC) a des propriétés comme, un module de Young élevé, une dureté élevée, une haute résistance aux chocs. Quant à l'ABS est un polymère thermoplastique présentant une bonne tenue aux chocs, relativement rigide et léger, toutefois, il est caractérisé par une faible résistance chimique et thermique. La composition de différents thermoplastiques permet de développer des matériaux plastiques permettant d'obtenir les propriétés désirées. Le mélange du PC avec l'ABS permet de conserver les propriétés mécaniques supérieures des deux polymères tout en minimisant leurs inconvénients. Le PC-ABS est un matériau généralement utilisé pour le prototypage des composants qui nécessitent de fortes caractéristiques mécaniques comme les pièces en automobile ou les pièces qui fonctionnent dans des milieux à température élevée. Les propriétés mécaniques du PC-ABS choisi pour la fabrication des prototypes sont en annexe II.3. Les paramètres de fabrication pour chaque prototype sont mis en annexe II.4.

a) **Prototype1**

Par ce modèle nous avons voulu répliquer le kit aimant original tel qu'il est, en termes de géométrie, de forme et de volume, et d'observer le comportement de cette pièce réalisée par F.A et de la comparer à celle faite par injection.

La Figure 22 montre le modèle CAO et le tableau 10 regroupe les caractéristiques géométriques.

| Paramètres | Valeur |
|--------------------|--------------------------------------|
| Volume | 15826 mm ³ |
| Moment d'inertie | 4,14.10 ⁵ mm ⁴ |
| Surface de contact | 2152,3 mm ² |

Tableau 10 : Paramètres clés du prototype1.

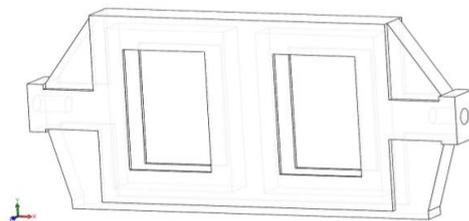


Figure 22 :Prototype1.

Ce prototype est fait en une seule pièce, la principale difficulté rencontrée pour ce modèle est l'obligation de faire une pause de l'impression pour permettre l'insertion des deux aimants

et des deux tiges filetées et puis relancer l'impression. Cette difficulté est due aux raisons suivantes :

- La température au sein de la machine FDM est très élevée, elle peut atteindre 160 °C. Une situation qui peut présenter des risques de sécurité pour l'opérateur.
- La mise en place des aimants et des tiges est très délicate, suite à l'attraction de ces éléments. De plus à la relance de l'impression, une attraction entre les aimants et la buse perturbe la trajectoire de cette dernière.
- L'arrêt de l'impression et l'ouverture de la machine pour l'insertion entraînent une chute de la température qui rend la liaison entre la première partie et la deuxième faible et la couche après la pause une ligne de faiblesse de la pièce.

4.4.3.1.1 Prototype2

La cause principale des difficultés rencontrées pour le prototype1 est l'arrêt de l'impression pour l'insertion des aimants et des tiges. Dans le prototype2 nous essaierons de respecter les mêmes contraintes que pour le prototype1 mais on ne réalisera pas le kit aimant en une seule pièce. On créera deux parties symétriques de la pièce plastique qu'on assemblera par vis, comme dans la Figure 23.

| Paramètres | Valeur |
|--------------------|-------------------------------------|
| Volume | 13716,7 mm ³ |
| Moment d'inertie | 3,7.10 ⁵ mm ⁴ |
| Surface de contact | 1874.9 mm ² |

Tableau 11: Paramètres clés du prototype2.

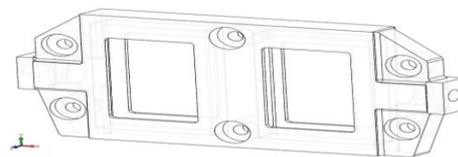


Figure 23 :Prototype2.

Ce prototype présente un avantage de désassemblage facile du kit aimant et une récupération simple des aimants et des tiges en FdV.

Puisqu'on a réduit la matière plastique pour faire des trous, ce prototype a un moment d'inertie plus faible. De plus, les bords avec une variation de l'épaisseur sont les régions de ruptures, Figure 24.

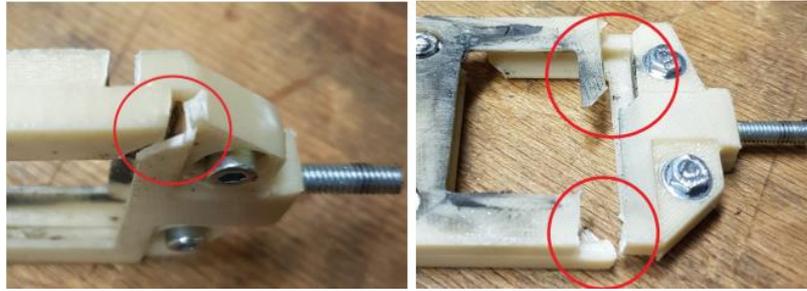


Figure 24 : Zones de ruptures du prototype2.

4.4.3.1.2 Prototype3

Ce prototype est une réponse directe à la rupture constatée dans le prototype précédent. Pour remédier à ça nous avons consolidé le volume en ajoutant de la matière au niveau des zones les plus faibles, tableau 12 et Figure 25.

| Paramètres | Valeur |
|--------------------|--------------------------------------|
| Volume | 15993,1 mm ³ |
| Moment d'inertie | 4,18.10 ⁵ mm ⁴ |
| Surface de contact | 2262 mm ² |

Tableau 12 : Paramètres clés du prototype3.

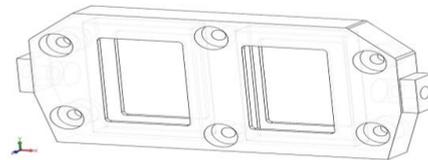


Figure 25 : Prototype3.

4.4.3.1.3 Prototype 4

Pour renforcer le prototype précédent et augmenter son moment d'inertie nous avons proposé de consolider les ouvertures sur l'aimant et de proposer une fermeture quadrillée à ce niveau, Figure 26.

| Paramètres | Valeur |
|--------------------|--------------------------------------|
| Volume | 16586,5 mm ³ |
| Moment d'inertie | 4,72.10 ⁵ mm ⁴ |
| Surface de contact | 3056,3 mm ² |

Tableau 13 : Paramètres clés du prototype4.

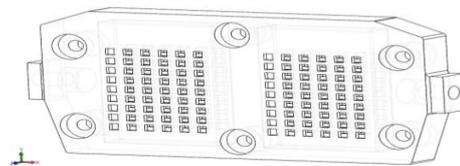


Figure 26 : Prototype4.

4.4.4 Test et validation

L'évaluation des prototypes permet d'observer l'évolution des exigences fonctionnelles en fonction des modifications apportées à chaque prototype et permet également de comparer la performance du prototype fabriqué par F.A avec la performance du composant neuf, dans ce cas, fabriqué par injection. Idéalement, l'évaluation du prototype se fait à partir des tests

mécaniques des propriétés de la pièce puis de leur comparaison à celles de la pièce neuve suite à une évaluation de cette dernière. Toutefois, dans l'impossibilité de mener ces tests, nous avons évalué les prototypes en les utilisant directement dans le produit, en conditions réelles d'utilisation, et nous avons observé le temps de fonctionnement de la pièce jusqu'à la rupture. Le système de sécurité permet de couper le courant au cas où l'oscillation du kit aimant s'amplifie ou se casse. Le test de la pièce s'est fait dans des conditions d'usage normal du compresseur HP80.

Sur la Figure 27 on observe l'évolution du temps de fonctionnement jusqu'à rupture en fonction du moment d'inertie de chaque prototype. On constate que les changements géométriques de la pièce ont eu un effet sur la durée de vie de la pièce.

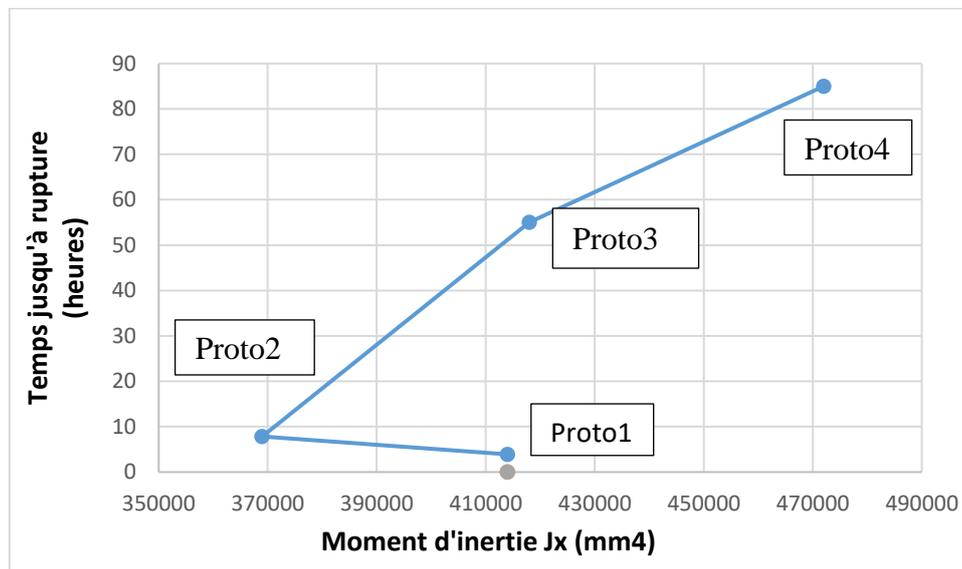


Figure 27 : Impact du moment d'inertie sur la durée de fonctionnement.

La durée jusqu'à la rupture de la pièce a été augmentée 21 fois du prototype 1 jusqu'au prototype 4, grâce aux changements significatifs apportés à la géométrie de la pièce. Les modifications du moment d'inertie et des fonctionnalités de la pièce comme renforcer les bords et éviter la variation de l'épaisseur de la pièce ont eu un impact conséquent sur la performance de la pièce. Le changement dans la gamme de fabrication du prototype 1 au prototype 2, en évitant l'arrêt de la fabrication (un arrêt qui entraînait une faible cohésion des deux parties au niveau de la couche de la pause de l'impression) a permis de doubler la durée de vie du composant. On observe également que du prototype 1 au prototype 2, il y a eu une importante amélioration même avec un moment d'inertie proche pour les deux prototypes. Ceci peut s'expliquer par la suppression de la variation de l'épaisseur au niveau des bords de la pièce.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé la démarche re-conception de composant en FdV pour le remanufacturing. Nous avons illustré cette démarche par le composant kit aimant du compresseur HP80 de l'entreprise cas de l'étude. L'objectif de cette démarche est de proposer de nouveaux prototypes qui remplissent les mêmes exigences fonctionnelles du composant en FdV sans forcément avoir les mêmes paramètres de conception. Le cas d'étude nous montre que malgré les améliorations obtenues dans la re-conception du composant pour le DFF, le résultat final reste loin des exigences fonctionnelles du composant réalisé par injection plastique. Précisément en termes de durée de vie et de résistance du composant qui reste encore très faible du composant réalisé par DFF.

Chapitre 5. Les bénéfices environnementaux et économiques face à la variabilité de l'état des produits à remanufacturer

5.1 Introduction

L'impact environnemental du produit Remanufacturé doit être évalué avant l'implémentation du remanufacturing. L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) permet d'étudier l'intérêt environnemental du remanufacturing en tenant compte des spécificités du produit et de son cycle de vie. Néanmoins, les normes ISO qui régissent les études d'ACV ne précisent pas la conduite des ACV des produits remanufacturés. Une lacune qui induit des résultats aléatoires d'ACV d'une étude à une autre en fonction du modèle posé par le pratiquant. A ceci, s'ajoute l'absence d'analyse de sensibilité sur la variabilité de l'état des produits à l'entrée du remanufacturing. Une variabilité qui peut impacter significativement les résultats de l'impact environnemental du remanufacturing. De plus, le coût de remanufacturing d'un produit dépend également de l'état du produit retourné, menant une difficulté de prévision des résultats économiques et environnementaux d'un produit à remanufacturer.

5.2 Evaluation environnementale du remanufacturing

5.2.1 Analyse de cycle de vie

L'Analyse de Cycle de Vie est la représentation et l'analyse quantifiées des entrées et sorties d'énergie et de matière aux frontières d'un système représentatif du cycle de vie d'un produit, d'une technologie ou d'un service (Grisel and Osset, 2005). Elle permet la comparaison des produits ou des services sur la base d'une unité fonctionnelle par rapport à leurs impacts environnementaux afin d'identifier la solution la plus vertueuse pour l'environnement (ISO 14040, 2006). Le déploiement de l'ACV se fait sur quatre étapes : définition des objectifs et des champs de l'étude, analyse de l'inventaire, évaluation de l'impact et enfin l'interprétation. Chacune des étapes est définie dans les normes de la série NF EN ISO 14040. Ci-dessous, la définition de chacune des étapes :

- **Définition des objectifs et des champs de l'étude NF EN ISO 14040**

Elle permet de définir, de décrire, le produit ou le service et de caractériser les frontières du système à l'étude et ses effets sur l'environnement que l'analyse cherche à évaluer.

- **Analyse de l'inventaire NF EN ISO 14041**

Cette phase permet d'identifier et de quantifier les flux élémentaires associés au cycle de vie du produit ou du service.

- **Evaluation de l'impact NF EN ISO 14042**

Cette phase permet de mettre en lien les flux élémentaires associés au cycle de vie du produit ou du service avec leurs impacts environnementaux.

- **Interprétation NF EN ISO 14043**

Cette étape permet d'évaluer l'analyse de l'inventaire et l'évaluation de l'impact en fonction des objectifs et des champs de l'étude définis en premier lieu et de choisir la solution ou le scénario le plus convenable à l'environnement. Cette étape peut être complétée par des analyses d'incertitude et de sensibilité.

Les résultats de l'ACV sont fortement dépendants de la délimitation du champ de l'étude et les précisions apportées au niveau de la première étape de l'ACV. La Figure 28 regroupe les quatre étapes de l'ACV.

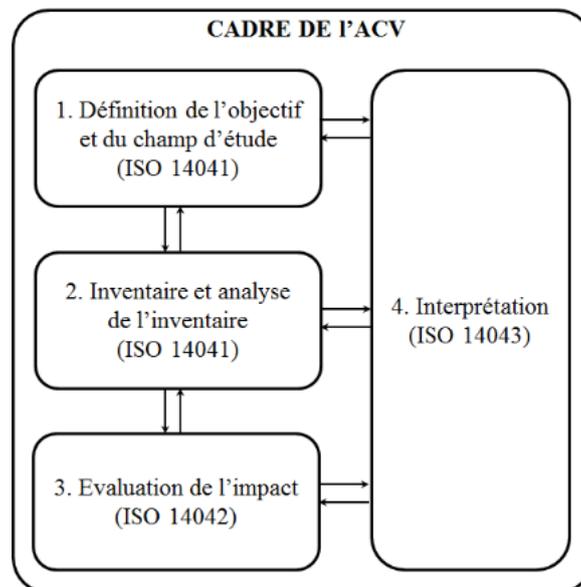


Figure 28 : Les étapes de l'Analyse de Cycle de Vie

5.2.2 L'ACV du remanufacturing

Au fil des ACV réalisées sur les stratégies de FdV en général et sur le remanufacturing en particulier, plusieurs difficultés ont été observées pour la comparaison entre les produits à phases d'usage multiple et les produits à cycle de vie classique avec un seul usage.

En général, les études sur l'ACV cherchent à répondre aux problématiques de manque et d'inexactitude de données, de variabilité et d'incertitude des modèles (Ross et al., 2002), (Lloyd and Ries, 2007) et les problèmes relatifs à la multifonctionnalité (Chomkham Sri et al., 2011). Ces problématiques concernent principalement les trois dernières étapes de l'ACV. L'étape de définition du champ de l'étude se réalise par la définition de l'unité fonctionnelle du système,

des catégories d'impacts à observer, des frontières du système ainsi que les hypothèses et les limites de l'étude. (Peters, 2016) a montré que les résultats d'ACV en remanufacturing varient significativement en fonction des choix adoptés en phase de définition du champ de l'étude. Ceci est dû à l'adoption d'une des deux perspectives communément utilisées dans la modélisation des ACVs du remanufacturing. Une perspective dite 'favorable' adoptée à 70% des articles étudiés, et une perspective 'neutre' adoptée à 30% des articles sélectionnés sur l'ACV des produits remanufacturés. La démarche 'favorable' consiste à mettre en avant les avantages environnementaux du Remanufacturing par l'ACV. Les choix méthodologiques de cette perspective consiste en une échelle de temps de l'unité fonctionnelle de court-terme, limité à un seul cycle de vie avec une méthode de sélection des frontières du système de type 'cut-off'. Où le premier cycle de vie du produit neuf, ne reçoit aucun crédit environnemental du prolongement de la durée de vie grâce au remanufacturing. Il est à ajouter que la perspective 'favorable' adopte un modèle de flux de référence limité. Quant à la perspective dite 'neutre', elle repose sur une échelle du temps de l'unité fonctionnelle de long terme, un nombre de cycles de vie multiple, une expansion des frontières du système d'étude et un modèle de flux de référence multiple. Dans une application des deux approches en ACV de comparaison entre une machine d'insertion de dossier neuve et le même type de machine remanufacturé. La première approche dite 'favorable' a comme résultat 24% de gain grâce au remanufacturing en impact de réchauffement climatique par rapport au produit neuf sur le long du cycle de vie du produit. Tandis que, la deuxième approche 'neutre' ne montre que 11% de gain pour le produit remanufacturé comparé au produit neuf sur l'impact de réchauffement climatique. Ceci, en adoptant la même méthode de calcul pour les deux démarches, mais avec deux différentes unités fonctionnelles. Pour la perspective 'favorable' l'unité fonctionnelle est définie sur un seul cycle de vie en comparant un produit neuf à un produit remanufacture. Pour la perspective 'neutre' l'unité fonctionnelle est définie sur le double de la durée de vie en comparant deux produits neufs avec un produit neuf plus le remanufacturé. Cette exemple montre l'impact des choix adoptés et de la modélisation en 1^{ère} phase d'ACV en remanufacturing sur les résultats des impacts environnementaux qui peuvent aller jusqu'au double d'une modélisation à une autre pour le même système. Quels sont les paramètres qui peuvent mener à cette variation des résultats d'ACV en remanufacturing ?

Pour (Peters, 2016) le plus important choix de modélisation qui biaise les résultats de l'ACV en remanufacturing est l'intégration ou non de la FdV du produit neuf dans le cycle du produit remanufacturé. Dans plusieurs ACVs, l'étape de définition du champ de l'étude manque d'informations répondant aux exigences de l'ISO14040, rendant difficile l'interprétation des

résultats. Puis le choix des frontières du système, la formulation de l'unité fonctionnelle et la définition du flux de référence, maximisent généralement le bénéfice environnemental du remanufacturing. Ces études adoptent une approche 'cut-off', où le produit neuf ne peut être crédité d'aucun bénéfice sur une éventuelle stratégie de FdV, des horizons de temps très courts, des modèles de flux de références restreints et une exclusion de quelques étapes du cycle de vie.

(Bauer, 2018) évoque plusieurs éléments qui peuvent compliquer, en général, l'ACV des produits pour une deuxième vie et précisément les produits repurposés : la diversité de l'unité fonctionnelle, les hypothèses sur les performances potentielles du second usage, des frontières et des allocations sur le cycle de vie, la problématique temporelle et l'analyse des résultats en fonction des objectifs définis.

(Amaya Rivas, 2012) propose un modèle paramétrique pour la comparaison de l'évaluation environnementale du cycle de vie d'un produit remanufacturé et le cycle de vie d'un produit neuf (nommé cycle classique). Il s'agit d'une méthodologie basée sur le concept de briques de cycle de vie de gestion de données en phase de conception proposée par (Gehin et al., 2009). Parmi les paramètres évoqués dans le modèle on trouve, le nombre de cycle d'usage ou le nombre de fois que le produit peut être remanufacturé. On trouve également des paramètres relatifs à l'efficacité du processus du remanufacturing comme le pourcentage des produits non collectés, la qualité des produits retournés, le pourcentage des produits remanufacturés, etc. En appliquant cette méthodologie, (Amaya Rivas, 2012) compare les impacts environnementaux d'une boîte de vitesse de camion neuve et une boîte de vitesse de camion remanufacturé. Le résultat, obtenu à partir de la méthode éco-indicator, montre un gain environnemental pour le produit remanufacturé de 25 ecopoints pour l'extraction de matériaux, 20 ecopoints pour la phase de fabrication et 5 ecopoints pour la FdV, les autres étapes du CdV sont identiques pour les deux types de produits.

5.2.3 Cas d'études dans la littérature d'ACV des produits remanufacturés :

Parmi les ACVs sur les impacts environnementaux du remanufacturing, on trouve (Boustani et al., 2010) qui étudient le remanufacturing d'une machine à laver, d'un réfrigérateur et d'un lave-vaisselle, les trois produits comparés aux neufs, sans intégrer les étapes du CdV de retour du produit, sont favorable à l'environnement sur l'impact de consommation d'énergie de 44%, 32% et de 14% respectivement. (Kara, 2010) comparent une cartouche jet d'encre neuve à celle remanufacturee sur un seul cycle de vie en incluant le transport et le recyclage pour les deux

types de produits. Le remanufacturing permet un gain de 33% sur l'impact éq. dioxyde de carbone. (Gell, 2008) analyse le remanufacturing de cartouche de toner en comparant le premier cycle de vie plus le processus de remanufacturing et le transport de retour du produit avec le CdV du produit neuf mais en excluant la phase d'usage. Cette étude obtient un résultat de 25% à 60% des gains sur l'impact Empreinte carbone. Une variation qui dépend de la durée d'usage et le nombre de fois possible de remanufacturer le produit. (Sundin and Lee, 2012) réalisent une revue de littérature sur 18 ACVs sur le remanufacturing. Cette étude avait pour but de démontrer que le remanufacturing est une meilleure option pour l'environnement comparé à la production du neuf. Cette étude n'a pas traité les questions méthodologiques de l'application de l'ACV en remanufacturing. Toutefois, elle révèle que sur les 18 ACVs étudiées, il y avait cinq choix différents de définition des frontières du système, mais une seule étude (Goldey et al., 2010) qui a fait le choix de multi-cycles en comparant un CdV de production plus un CdV de remanufacturing avec 2 CdVs de production. (Biswas et al., 2013) ont réalisé une ACV sur un compresseur d'air pour la réfrigération. Dans cette étude, il est estimé que le compresseur remanufacturé peut éviter jusqu'à 66% des impacts des émissions de gaz à effets de serre comparé au compresseur neuf. Toutefois, cette étude se limitait sur un seul CdV qui ne comprenait pas la phase d'usage, de plus, l'unité fonctionnelle ne spécifiait pas la durée de vie du produit. (Zanghelini et al., 2014) réalisent une ACV de comparaison entre un compresseur d'air neuf et remanufacturé. Ils obtiennent un résultat de 40% pour le compresseur remanufacturé. Cette ACV ne comprend pas plusieurs cycles. Certes, cette étude se limite également à un seul CdV, mais contrairement à l'étude de (Biswas et al., 2013), (Zanghelini et al., 2014) élargit les frontières du système et tient compte pour les deux CdVs neufs et remanufacturés des déchets générés par le produit neuf. L'étude tenait bien compte de la durée de vie du produit dans l'expression de l'unité fonctionnelle.

Ces différents cas d'études exposés dans la littérature nous montrent que différentes modélisations ont été adoptées menant à des résultats disparates d'une étude à l'autre. Toutes ces études ont comme objectif de démontrer l'intérêt environnemental du remanufacturing comparé à la production du neuf. De ce fait, il est nécessaire, de spécifier des recommandations pour la conduite de l'ACV en remanufacturing.

5.2.4 Les recommandations pour l'ACV du remanufacturing :

A partir de l'analyse des ACVs de Remanufacturing existant dans la littérature et à partir des recommandations de la littérature, nous proposons dans la suite un ensemble de recommandations pour la conduite d'ACV pour le remanufacturing. Dans les recommandations

proposées dans la littérature on trouve celles de (Peters, 2016) sur la phase de définition des champs de l'étude, de (Plevin et al., 2014) sur la concordance entre l'interprétation des résultats et les objectifs déclarés au début de l'ACV ainsi que la formulation des résultats. Puis, les paramètres définis dans le modèle de (Amaya Rivas, 2012). Nous listons les recommandations essentielles pour la conduite de l'ACV :

- Définir clairement les objectifs et le cadre de l'étude, en accord avec les études précédentes,
- Préciser le but et le public visé par l'ACV en utilisant une terminologie semblable à celle utilisée dans les normes et les études ACV réalisées.
- Formuler les résultats de manière appropriée dans les rapports d'ACV de sorte à intégrer un possible effet rebond en précisant que l'utilisation de plus de produits remanufacturés n'induit pas systématiquement la réduction calculée,
- L'ACV pour le remanufacturing suppose plus d'hypothèses et de variabilités que les ACV habituelles. D'où la nécessité de varier les hypothèses établies et d'attribuer de nouvelles valeurs à ces hypothèses dans le cadre d'analyse de sensibilité et d'incertitude.

5.3 Analyse de Cycle de Vie du compresseur HP80

5.3.1 Contexte

Cette étude a pour but d'évaluer les impacts environnementaux d'un compresseur d'air neuf et de comparer les impacts issus de son cycle de vie avec les impacts environnementaux du même compresseur d'air remanufacturé par la société AQUA Assainissement. Cette évaluation se fera au moyen de la méthodologie de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV).

Cette étude s'inscrit dans l'initiative prise par l'entreprise AQUA-assainissement visant la récupération des compresseurs d'air ayant encore une valeur d'usage. En effet, ils souhaitent mettre en œuvre une chaîne de récupération de ces compresseurs pour les remanufacturer et les remettre sur le marché pour un deuxième usage. Cette étude cherche à valider l'intérêt des produits remanufacturés d'un point de vue environnemental, en comparant l'impact de ces derniers à celui des produits neufs.

Le remanufacturing des produits permet de créer de nouvelles phases d'utilisation des produits en restaurant le produit à un niveau de performance au moins égal à celui d'un produit neuf. Le remanufacturing permet ainsi de prolonger le cycle de vie des produits et d'éviter les impacts environnementaux de plusieurs étapes du cycle de vie dont l'extraction de matière et

la fabrication du produit. Toutefois, une Analyse de Cycle de Vie doit prendre en considération, dans la comparaison des deux cycles de vie du produit, le transfert d'impacts qui pourrait se créer entre étapes du cycle de vie.

La comparaison environnementale est réalisée sur la base de la méthodologie d'analyse du cycle de vie, telle que régit par l'Organisation Internationale de normalisation dans les normes ISO 14040 et ISO14044. Le rapport d'ACV comprend : Les objectifs et le champ de l'étude, L'inventaire, les résultats de l'ACV environnementale, l'interprétation des résultats et les conclusions de l'étude.

5.3.2 Méthodologie générale

Cette analyse de cycle de vie concerne un compresseur d'air de marque HIBLOW HP80 qui a comme fonction la génération de l'air comprimé à un débit de 110 l/min. La durée de vie de l'utilisation des compresseurs sujets de l'étude est définie par le FEO à 25 000 heures ou 10 ans d'utilisation. Nous nous sommes basés sur ces données pour définir l'unité fonctionnelle suivante : « Produire de l'air comprimé pour un temps d'usage de 25 000 heures sur 10 ans ».

Pour que le compresseur remanufacturé et le compresseur neuf soient comparables, comme l'exige l'Analyse de Cycle de Vie, l'hypothèse a été faite que le compresseur remanufacturé remplace le compresseur neuf, qui aurait dû être utilisé si le compresseur remanufacturé n'avait pas été acheté. Ceci, est permis grâce à l'activité de remanufacturing qui permet de retrouver les caractéristiques techniques du produit neuf.

Les standards et guides d'analyse de cycle de vie permettent de guider les praticiens à conduire les analyses de cycle de vie (ISO14040 et ISO 14044). Toutefois, il n'existe pas de standards ou de guides disponibles pour les produits remanufacturés. Les modèles d'analyse de cycle de vie pour les produits remanufacturés sont basés sur les guides généraux d'Analyse de Cycle de Vie et les recommandations qui ont été formulées à partir des ACVs réalisées par les praticiens.

Dans cette étude, nous avons opté pour une modélisation holistique des deux cycles de vie des produits neufs et remanufacturés. Ceci, afin d'éviter les transferts d'impact qui pourraient se créer si on ne traite pas une ou plusieurs étapes du cycle de vie. Par exemple, le transport du produit remanufacturé du premier utilisateur au centre de remanufacturing, étape qui n'existe pas dans le cycle de vie du produit neuf. L'avantage environnemental des produits remanufacturés a été déjà démontré dans des travaux antérieurs avec différentes définitions des frontières du système à l'étude. Des modélisations donnent des résultats allant de 46 % jusqu'à 96 % de gain d'impact environnemental en adoptant le scénario « remanufacturing des produits

en fin d'usage ». Afin de garder une perspective la plus neutre possible, qui ne favorise pas systématiquement le produit remanufacturé et qui correspond à la réalité observée dans le processus de remanufacturing chez AQUA-Assainissement, nous avons tenu compte de constats souvent négligés dans la littérature. Toutes les activités reliées au processus de remanufacturing ont été listées et prises en compte. Toutes les hypothèses faites dans cette étude seront détaillées dans la suite.

Nous avons fait en sorte d'utiliser des données provenant principalement des acteurs du cycle de vie concernés. Sachant qu'AQUA-Assainissement n'est pas le fabricant du compresseur Hiblow HP-80, nous avons manqué de données sur les étapes du cycle de vie en amont de la phase d'usage notamment : l'extraction des matières premières, la fabrication des composants et leurs assemblages. Pour compléter ces données nous nous sommes basés sur la banque de données européenne EcoInvent 3.0. Les données sur le produit, comme exemple le poids de chaque matériau dans chaque composant ont été obtenues directement en démontant le produit et en pesant chaque matériau, un travail qui a permis la constitution de la nomenclature du produit présentée dans le chapitre 3. L'évaluation des impacts du cycle de vie a été réalisée à l'aide de la méthode IMPACT 2002+ sur le logiciel SimaPro. La méthode impact 2002+ est une méthode d'analyse de l'impact permettant à la fois une évaluation au niveau des impacts mais également au niveau des dommages : deux types d'évaluations que nous réalisons dans cette étude.

5.3.3 Champs de l'étude

Les objectifs de cette étude sont :

- Évaluer et comparer les impacts environnementaux associés au cycle de vie du compresseur HIBLOW HP80 neuf et remanufacturé.
- Identifier et comparer les paramètres clés environnementaux des deux compresseurs, neuf et remanufacturé, le long de leurs cycles de vie, c'est-à-dire les étapes ou les processus du cycle de vie sont particulièrement contributeurs aux dommages environnementaux définis dans cette étude.

Les résultats de cette étude permettront de valider les gains environnementaux liés au remanufacturing mené par l'entreprise AQUA par rapport aux produits neufs qu'elle vend. Une fois ces résultats validés, ils permettront de déboucher sur une communication environnementale du produit utilisant une des normes de la série des ISO 14020.

5.3.3.1 Unité fonctionnelle

Le produit étudié est évalué sur sa fonction principale qui est de produire de l'air comprimé à un débit de 110 l/min. L'unité fonctionnelle se définit comme la référence quantitative à laquelle se rapportent les calculs d'inventaire et d'évaluation des impacts. Dans notre étude elle est ainsi définie :

« Produire de l'air comprimé pour un temps d'usage de 25000 heures sur 10 ans ».

L'unité fonctionnelle est établie suivant la durée de vie du compresseur défini par le constructeur. La même unité fonctionnelle va de pair pour les deux cycles de vie celui du compresseur neuf et également celui du compresseur remanufacturé.

5.3.3.2 Frontières du système d'étude

Les frontières du système d'étude permettent de cerner les éléments géographiques, temporels ou technologiques qui définissent le système. Ces frontières délimitent, également, les étapes du cycle de vie qui seront incluses dans le calcul de l'impact environnemental.

Les compresseurs collectés et retournés à AQUA Assainissement ne sont pas systématiquement remanufacturés. Après un diagnostic de l'état des compresseurs, quelques compresseurs sont mis au rebut final. Dans le cas d'Aqua-Assainissement il a été observé qu'en moyenne sur trois compresseurs reçus pour le remanufacturing, uniquement deux compresseurs satisfont les conditions de Remanufacturabilité établies par Aqua-Assainissement. Un constat qui a permis d'élaborer la modélisation des deux cycles de vie. De cela, nous avons pris en compte 4 phases d'utilisation (3 phases d'utilisation de 3 produits neufs et 1 phase d'utilisation de 1 produit remanufacturé), avec un produit sur trois produits retournés ne sera pas remanufacturé (mais il a été quand même retourné au centre de remanufacturing). Ce retour implique des impacts environnementaux dus à la logistique inverse ainsi qu'à des tâches de diagnostic éventuellement. Jusqu'à présent le diagnostic des produits retournés chez Aqua se fait par l'opérateur de façon visuelle et tactile et n'entraîne pas des impacts environnementaux.

La modélisation holistique de l'ensemble des deux cycles de vie permettra d'éviter le transfert d'impact qui peut survenir entre les étapes de cycle de vie. La Figure 29 illustre la modélisation du cycle de vie du compresseur neuf pour 1 usage et la Figure 30 illustre le cycle de vie du compresseur remanufacturé 1 usage (le premier usage étant réalisé par un produit neuf):



Figure 29 : Cycle de vie du compresseur neuf pour un usage..

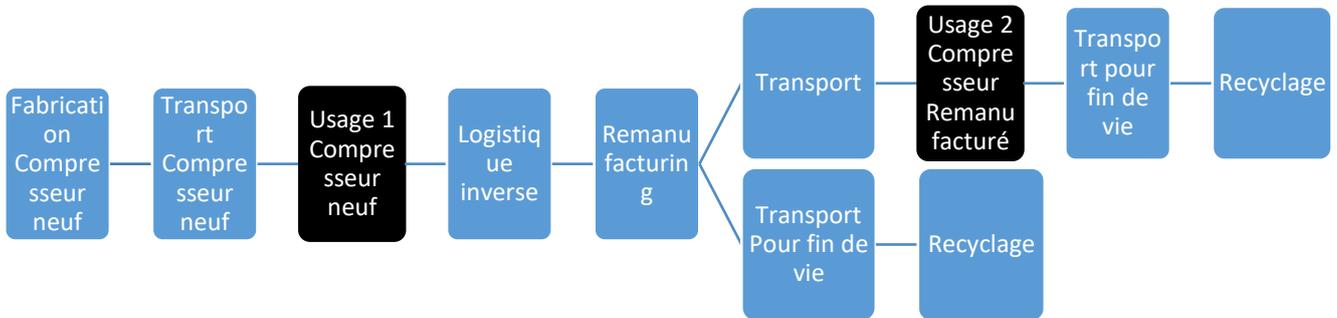


Figure 30 : Cycle de vie du compresseur remanufacturé pour deux usages.

5.3.4 Inventaire des données des étapes de cycle de vie

Le compresseur en étude est un produit conçu par une entreprise japonaise Hiblow, fabriqué dans une usine en Philippines et utilisé en France. La disparité géographique des acteurs et la pluralité des acteurs ont compliqué l'obtention des informations relatives aux étapes de production et de l'extraction de la matière première. Pour répondre à cela, nous nous sommes basés sur la banque de données Ecoinvent 3.0 du logiciel Sima pro à partir des données Market {GLO} pour la phase de fabrication. Une analyse technique du produit a été établie afin de comprendre le fonctionnement du produit et de ressortir les données relatives au poids et aux matières constituant chaque composant du produit et le moyen de réalisation de chaque composant. Pour la phase du transport, un échange avec le fournisseur nous a permis d'obtenir des données des étapes de transport du produit en détails entre l'usine aux Philippines et les clients en France. Quant à la phase d'usage, nous sommes partis sur un usage idéal tel que défini par le constructeur et qui garantit dans des bonnes conditions d'usage une durée de vie précisée par le constructeur. On a considéré que le compresseur fonctionne 25000 heures avant qu'il soit retourné pour remanufacturing. Nous avons également pris en compte dans la phase de maintenance les pièces qui s'usent en cours d'usage et qui nécessitent des changements avant la fin de vie du produit. Pour l'étape du remanufacturing, on a comptabilisé les pièces qui sont remplacées par des pièces neuves et un fonctionnement de 30 min pour faire le test du produit remanufacturé. Nous n'avons pas pris en compte dans cette étude, que ce soit pour la phase de production ou le remanufacturing, les impacts issus des locaux de travail, l'éclairage par

exemple. Nous avons pris en compte le transport effectué de chez l'utilisateur de la phase 1 au centre de remanufacturing, afin d'observer si cette phase de déplacement pénalise ou non le remanufacturing par rapport au produit neuf.

Le tableau 14 récapitule les données obtenues relatives à chaque étape du cycle de vie du produit neuf. Le tableau 15 regroupe les données des étapes du cycle de vie du produit remanufacturé.

Tableau 14 : Données par rapport à chaque étape de cycle de vie du produit neuf.

| Fabrication | Transport | Usage | Fin de vie |
|--|---|--|-----------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> •Matières de chaque composant. •Poids de chaque composant. •Mode de fabrication de chaque composant. | <ul style="list-style-type: none"> •Philippines -> Pays bas (20200 km par bateau). •Pays bas -> Argenteuil (450km par camion). •Argenteuil -> Client (700km par camion) | <ul style="list-style-type: none"> •Durée de vie : 10 ans ou 25000 heures. •Puissance du compresseur 70 W. •Maintenance sur les 10 ans: 10 membranes - 10 clapets anti-retour. (à changer tous les 2 ans sur les deux côtés). | <p>Fin de vie 100% en France.</p> |

Tableau 15 : Données par rapport à chaque étape de cycle de vie du produit remanufacturé.

| Fabrication | Transport | Usage | Logistique inversée | Remanufacturing | Transport | Usage | Fin de vie |
|---|---|--|--|---|--|--|-----------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> •Matières de chaque composant. •Poids de chaque composant. •Mode de fabrication de chaque composant | <ul style="list-style-type: none"> •Philippine s -> Pays bas (20200 km par bateau). •Pays bas -> Argenteuil (450km) | <ul style="list-style-type: none"> •Durée de vie : 10 ans ou 25000 heures. •Puissance du compresseur 70 W. •Maintenance sur les | <ul style="list-style-type: none"> •On suppose que les clients sont à un rayon de 300km du site de remanufacturing d'AQUA | <ul style="list-style-type: none"> •Les pièces à changer systématiquement : •Les deux membranes. •Filtre. • 2 Chambre à clapet. | <ul style="list-style-type: none"> •On suppose que les clients sont à un rayon de 300km du site de remanufacturing d'AQUA | <ul style="list-style-type: none"> •Durée de vie : 10 ans ou 25000 heures. •Puissance du compresseur 70 W. | <p>Fin de vie 100% en France.</p> |

| | | | | | | | |
|--|--|---|--|--|--|---|--|
| | <p>par camion). Argenteuil -> Client (700km par camion)</p> | <p>10 ans : 10 membranes - 10 clapets anti-retour. (à changer tous les 2 ans sur les deux côtés).</p> | | <ul style="list-style-type: none"> • Le kit aimant une fois sur 5 produits reçus. • On ajoute à ceci une consommation électrique de 30 min pour tester le produit remanufacturé, | | <ul style="list-style-type: none"> • Maintena nce sur les 10 ans: 10 membran es - 10 clapets anti-retour. (à changer tous les 2 ans sur les deux côtés). | |
|--|--|---|--|--|--|---|--|

5.3.5 Résultats de l'ACV

5.3.5.1 Résultats du cycle de vie d'un compresseur neuf

La Figure 31 présente les résultats des impacts de dommages pour l'ensemble du cycle de vie.

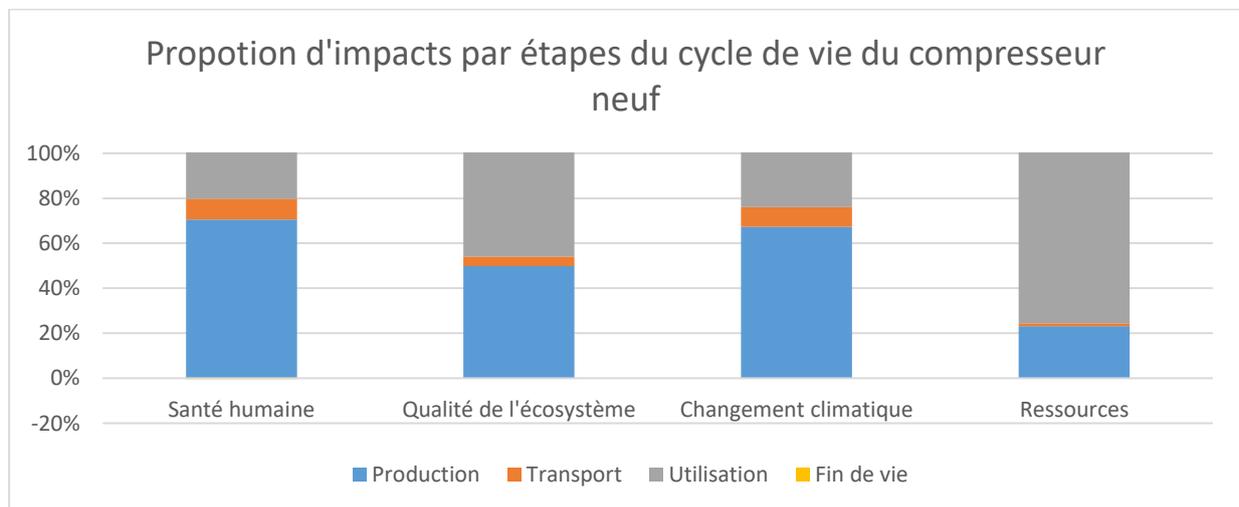


Figure 31 : Proportion d'impacts par étapes du cycle de vie du compresseur neuf.

Le long du cycle de vie, on trouve que les phases d'utilisation et de production sont les étapes du cycle de vie les plus impactant sur toutes les catégories de dommages, santé humaine, qualité de l'écosystème, changement climatique et ressources. L'impact de la phase d'utilisation varie entre 20 % sur la santé humaine jusqu'à atteindre 78 % sur la consommation des ressources. L'impact élevé de la phase d'utilisation sur les ressources s'explique par la consommation

électrique, 1400 kWh durant l'usage, et à un moindre effet la maintenance nécessaire durant la phase d'utilisation. Les valeurs absolues de l'impact de chaque étape du cycle de vie sur chaque catégorie de dommage sont en annexe III.1.

5.3.5.2 Catégories d'impacts

Les catégories d'impacts quantifient les effets globaux des substances émises ou consommées. De toutes les catégories d'impacts, dit également, catégories intermédiaires, nous avons sélectionné tout au début de l'étude des catégories d'impacts en lien avec le milieu d'utilisation du compresseur. Sachant que le compresseur s'utilise pour les micro-stations d'épuration, un milieu aquatique, nous avons jugés nécessaires d'observer les catégories d'impacts aquatiques tels que l'écotoxicité aquatique, acidification du milieu aquatique et eutrophisation. Nous avons également pris en compte dans l'évaluation des catégories d'impacts concernant le réchauffement climatique, l'épuisement des minéraux et l'utilisation des énergies renouvelables, qui sont souvent avancées comme moins impactées dans les scénarios de remanufacturing (économie de matière et d'énergie).

La Figure 32 compare les catégories d'impacts évaluées pour le compresseur neuf et pour le compresseur remanufacturé.

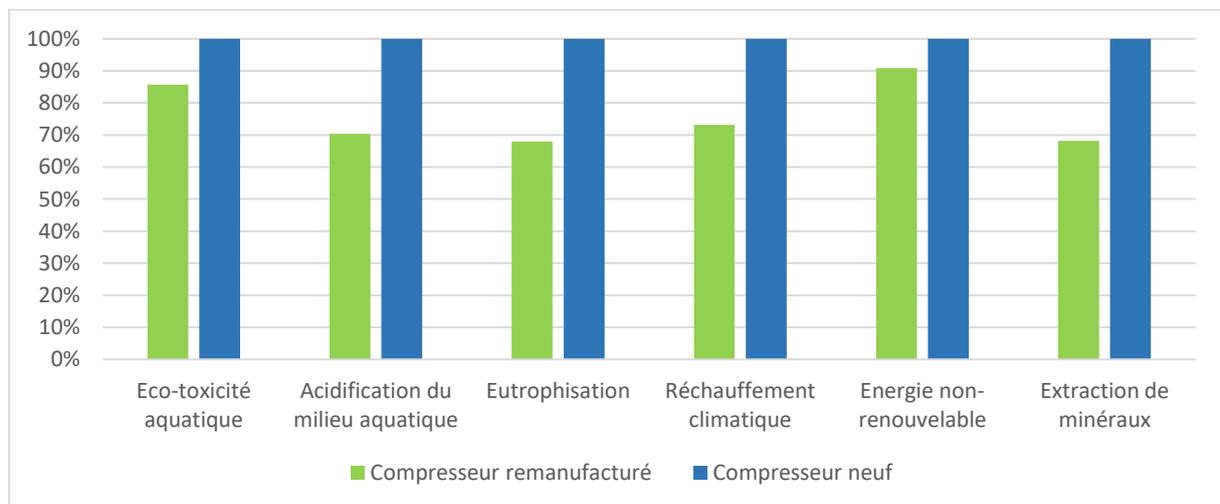


Figure 32 : Comparaison des catégories d'impacts du compresseur neuf et remanufacturé.

On observe dans la Figure 32 que le produit remanufacturé présente un avantage environnemental sur toutes les catégories d'impacts. Cette réduction d'impact environnemental s'explique par l'évitement des phases d'extraction de matière et de production. Chose que l'on constate sur la catégorie d'impact extraction de minéraux qui présente le plus grand écart entre l'impact du produit neuf et du produit remanufacturé, contrairement, à la catégorie d'impact énergie renouvelable qui a le plus faible écart. Ceci, s'explique par le fait que les deux produits

ont une étape d'utilisation énergivore et identique. La réduction constatée est obtenue au niveau des autres étapes de cycle de vie particulièrement l'évitement de consommation d'énergie en phase de production.

Sur toutes les autres catégories d'impacts non sélectionnées dans cette étude, on trouve la même tendance du gain environnemental que présente le produit remanufacturé par rapport au produit neuf.

La catégorie d'impact réchauffement climatique permet de comptabiliser l'équivalent en CO₂ des gaz à effet de serre. Il s'agit de l'une des catégories les plus mises en avant sur les résultats d'Analyse de Cycle de Vie. La Figure 33 illustre la comparaison entre les émissions en équivalent des gaz à effet de serre du produit remanufacturé et du produit neuf.

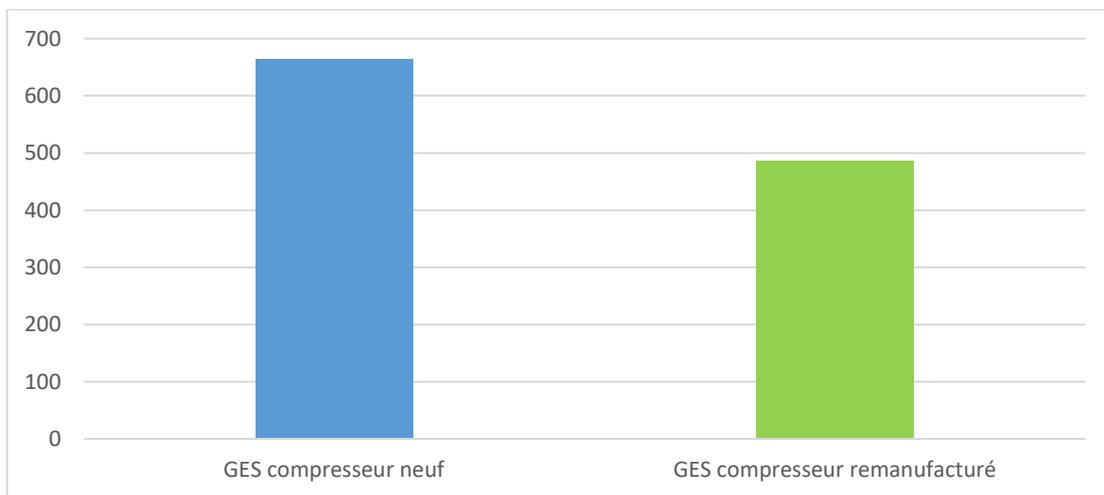


Figure 33 : *Gaz à effet de serre sur un seul cycle de vie pour le compresseur neuf et le remanufacturé.*

Le graphe présente les émissions en kg éq CO₂ rapporté sur un seul cycle de vie contenant une seule phase d'utilisation, qui donne 664 kg éq CO₂ pour le compresseur neuf et 486 kg éq CO₂ pour le compresseur remanufacturé. Le produit Remanufacturé permet un évitement d'impact environnemental de 178 kg éq CO₂.

5.3.5.3 Comparaison des catégories de dommages

La comparaison d'impacts de dommages entre produit neuf et remanufacturé est illustrée dans la Figure 34 :

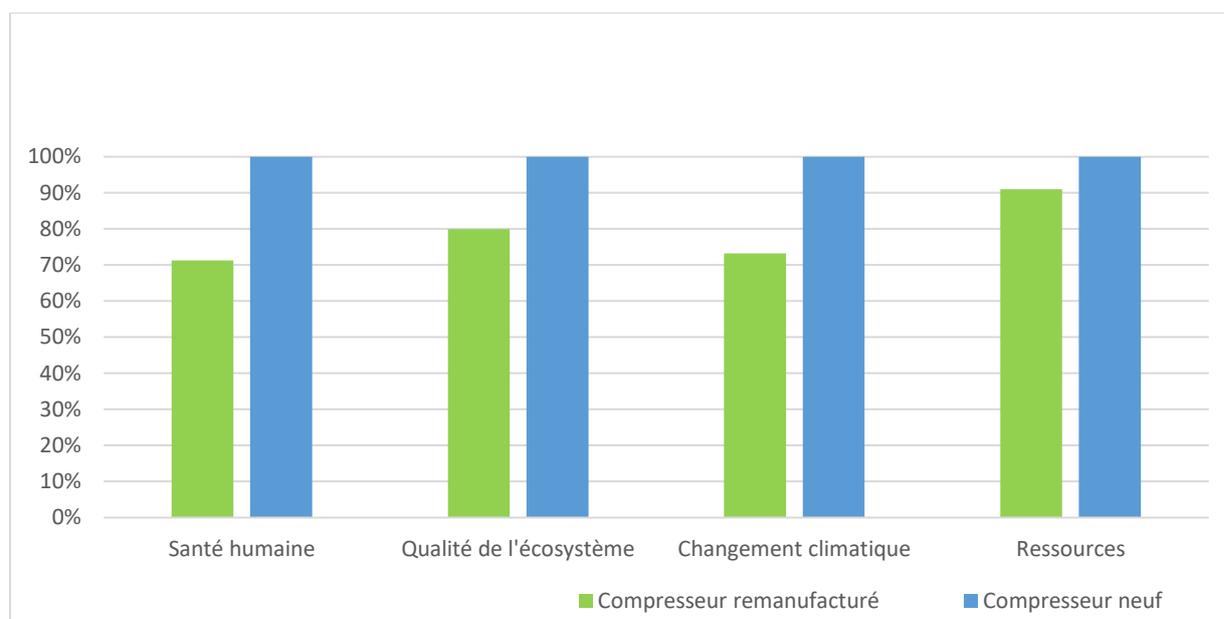


Figure 34 : Impacts environnementaux du compresseur neuf et remanufacturé

On déduit que le produit remanufacturé reste avantageux d'un point de vue environnemental sur toutes les catégories de dommages. L'écart varie de 10% (catégorie de dommages ressources) pour atteindre 30 % (pour la catégorie changement climatique).

5.3.5.4 Conclusion

En comparant les catégories de dommages et d'impacts évaluées sur le cycle de vie du produit neuf et du produit remanufacturé, on trouve que le remanufacturing permet de réduire sensiblement l'impact environnemental du compresseur jusqu'à un pourcentage pouvant aller jusqu'à 30% sur plusieurs catégories.

5.3.6 Retour sur les hypothèses de l'étude

Tout au long de l'étude nous avons formulé un certain nombre d'hypothèses afin de modéliser les cycles de vie des produits neufs et remanufacturés. Une réévaluation de ces hypothèses après simulation des résultats est nécessaire pour juger à quel point un changement dans ces hypothèses peut influencer les résultats obtenus.

5.3.6.1 Première hypothèse

Pour obtenir la modélisation définie au début de l'étude, nous nous sommes basés sur un taux de remanufacturing égale à 67 %, c.-à-d., sur 3 produits reçus par l'entreprise Aqua pour le remanufacturing uniquement 2 produits sont remanufacturés. Ce taux a été observé durant les sessions préliminaires de remanufacturing. Ce taux dépend de la qualité des produits

retournés jusqu'à l'entreprise. Évidemment, l'augmentation de ce taux implique une augmentation de l'écart de l'impact bénéfique entre le produit neuf et le produit remanufacturé. Néanmoins, la réduction de ce taux peut potentiellement causer l'augmentation des impacts sur l'environnement. Ainsi, nous avons réévalué les impacts pour une configuration d'un seul produit remanufacturé à partir de deux produits reçus. Un taux de 50 % donne les impacts environnementaux illustrés sur la Figure 35 :

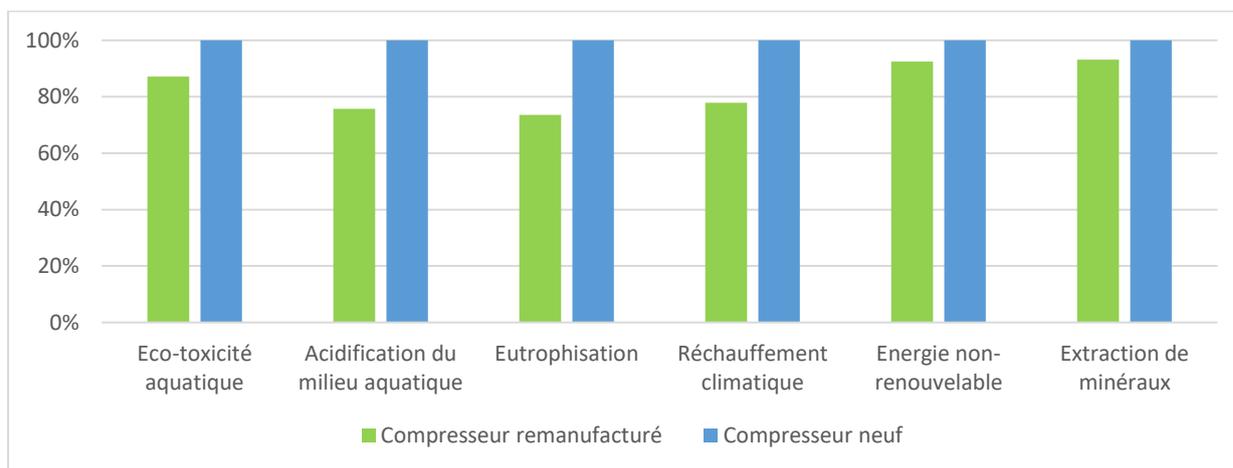


Figure 35 : Comparaison des catégories d'impacts du compresseur neuf et remanufacturé avec un taux de récupération de 50%.

On constate que le produit remanufacturé présente toujours un avantage environnemental par rapport au produit neuf à un pourcentage allant jusqu'à 25%.

La Figure 36 montre la comparaison des gains environnementaux entre les deux modélisations en variant uniquement l'hypothèse relative au taux de récupération des produits.

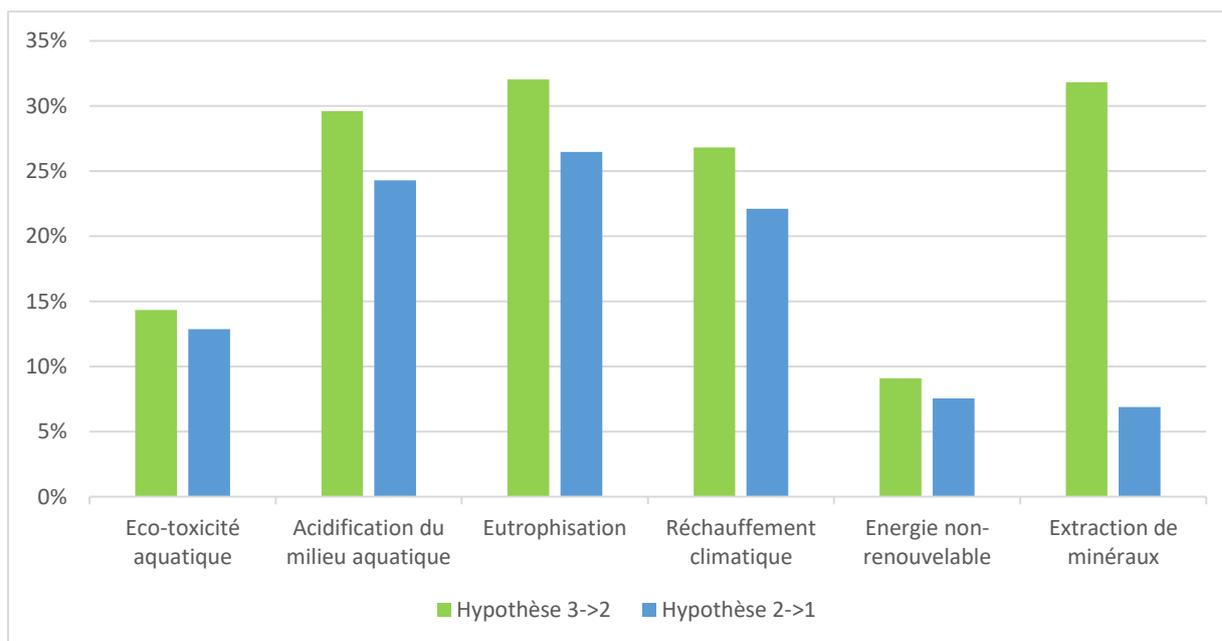


Figure 36 : Comparaison des impacts environnementaux par rapport à un taux de récupération de 67% et de 50%.

On observe du graphe que l'hypothèse tenue dans cette étude est une hypothèse qui favorise le produit remanufacturé jusqu'à 15% pour la catégorie d'impact extraction de minéraux, ceci après une variation de l'hypothèse de 27%. Il est de l'intérêt de l'entreprise de garder au plus haut cet indicateur afin de réaliser des gains environnementaux plus importants. Toutefois ce taux reste dépendant de la qualité du produit en fin de vie. Un système de vérification de l'état du produit avant envoi permettra de maintenir cet indicateur à un niveau élevé afin d'éviter le transport jusqu'à l'entreprise et l'activité de remanufacturing. Il est intéressant d'observer la variation de ce taux dans le futur à l'atelier afin de le comparer aux taux considérés dans cette étude.

5.3.6.2 Deuxième hypothèse

Une des hypothèses faites pour cette étude est relative à la durée de vie du produit. Nous avons considéré que le produit fonctionne pour 25 000 heures sur 10 ans tels que défini par le constructeur. Une donnée qui peut varier en fonction du comportement de l'utilisateur spécialement face à la maintenance du produit. Il a été constaté durant les sessions de tests du remanufacturing que plusieurs produits ont été retournés alors qu'ils nécessitaient juste une opération de maintenance. Ce manque de suivi de la maintenance réduit la durée de vie du produit et peut influencer les résultats de l'impact du produit. Toutefois, au vu de l'objectif de l'étude visant à comparer le cycle de vie du produit neuf avec celui du produit remanufacturé et tenant compte de la modélisation, la comparaison de ces deux cycles de vie revient à évaluer les étapes de cycle de vie du produit neuf tableau 16 et les étapes de cycle de vie mentionnées dans le tableau 17 puis pour ramener à un seul cycle de vie (division par cinq).

Tableau 16 : Etapes de cycle de vie du produit neuf déterminantes dans la comparaison entre produit neuf et remanufacturé.

| Etapes du cycle de vie | Nombre de fois incluse dans le calcul |
|--|---------------------------------------|
| • Fabrication compresseur et extraction de matière | Deux fois |
| • Transport compresseur neuf | Deux fois |
| • Transport fin de vie | Deux fois |

| | |
|-------------|-----------|
| • Recyclage | Deux fois |
|-------------|-----------|

Tableau 17 : *Etapas de cycle de vie du produit remanufacturé déterminantes dans la comparaison entre produit neuf et remanufacturé.*

| Etapas du cycle de vie | Nombre de fois incluse dans le calcul |
|---|---------------------------------------|
| • Logistique inverse | Trois fois |
| • Remanufacturing | Deux fois |
| • Passage au centre de remanufacturing sans que le produit soit bon pour le remanufacturing | Une seule fois |
| • Transport fin de vie | Deux fois |

De cela, on déduit que la phase d'utilisation n'est pas déterminante pour l'objectif de l'analyse du cycle de vie qui est de comparer entre les deux cycles de vie. En revanche, la phase d'utilisation reste déterminante pour l'analyse du cycle de vie du produit neuf et nécessite une analyse du comportement de l'utilisateur et son respect des consignes de maintenance définies par le constructeur.

5.3.6.3 Troisième hypothèse

Un produit neuf a la même performance qu'un produit remanufacturé. A L'issue du remanufacturing l'entreprise AQUA garantit les performances et les caractéristiques identiques à celles d'un produit neuf sans connaître, jusqu'à présent, l'exactitude de cette hypothèse par rapport à l'utilisation des produits remanufacturés : est-ce que ces produits assureront la même unité fonctionnelle avec les mêmes performances ? Un retour d'expérience sur les produits remanufacturés permettra de valider ou non cette hypothèse. Toutefois, une réduction des performances impliquent une réduction des gains d'impacts obtenus par le remanufacturing.

5.3.7 Conclusion sur l'ACV du compresseur

Cette analyse de cycle de vie a tenu compte d'une modélisation holistique comprenant toutes les étapes du cycle de vie du produit remanufacturé et du produit neuf. Cette étude a permis de comparer les impacts environnementaux des deux produits. Elle a montré, à partir des hypothèses établies, que le produit remanufacturé a un impact environnemental moins important par rapport au produit neuf. Étant donné que l'entreprise AQUA ne fabrique pas ce produit, nous manquons de données pour caractériser les phases d'extraction de matière et de fabrication. Toutefois, une décomposition du produit nous a permis de construire les données à partir des bases de données du logiciel SimaPro (EcoInvent 3.0). Cette étude pourra servir à communiquer avec les clients d'AQUA sur les bénéfices environnementaux des produits remanufacturés. Cette analyse a permis également de varier et d'étudier les hypothèses de remanufacturing et de chiffrer l'impact environnemental de chaque composant.

5.4 Produit remanufacturé ou produit neuf, lequel choisir ?

On a vu, grâce à l'ACV réalisée sur le compresseur d'air de l'entreprise Aqua, que le produit remanufacturé présente un évitement d'impact environnemental considérable. On a vu que même dans le cas où 50% des produits retournés au centre de remanufacturing ne sont pas remanufacturables (un scénario qui reste extrême par rapport à la réalité observée en entreprise, ce paramètre se situe vers 30%), le produit remanufacturé garde un avantage environnemental par rapport au neuf. Ce constat, met l'avantage environnemental du remanufacturé à l'abri de la variation de l'état du produit en FdV. Toutefois, l'état du produit retourné influence fortement le coût du produit remanufacturé. De plus, les produits neufs présentent une marge plus importante que celle des produits remanufacturés. Une cannibalisation par ces derniers réduira les bénéfices de l'entreprise. Une réalité économique pouvant mener au non-remanufacturing de plusieurs produits retournés. Ainsi, dégradant le rendement environnemental du remanufacturing. De ceci, la question suivante s'impose, comment l'entreprise peut optimiser ses ventes de produit neufs et remanufacturés de façon à assurer un gain optimal à la fois environnemental et économique ?

5.4.1 Un profit vert optimal face à une probable cannibalisation des produits neufs par des produits remanufacturés

L'intérêt économique recherché par les Indépendants-R grâce à l'activité du remanufacturing est une motivation centrale pour l'implémentation du remanufacturing. De plus, c'est une condition nécessaire pour la vitalité de l'activité du remanufacturing. Les

Remanufacturers, FEO-R ou Independent-R, qui vendent à la fois les produits neufs et les produits remanufacturés doivent faire face à l'effet de cannibalisation des produits neufs par les produits remanufacturés (Kwak and Kim, 2017). La cannibalisation est définie par (Lomax et al., 1997) en tant qu' 'un processus par le lequel un nouveau produit se vend plus en détournant les ventes d'un produit existant'. La cannibalisation est considérée comme une contrainte majeure contre l'implémentation du remanufacturing et plusieurs entreprises considèrent que la vente des produits remanufacturés cannibaliserait inéluctablement les produits neufs et donc une marge de profit moindre (Jr and Li, 2010). Sachant que les produits remanufacturés ont les mêmes fonctions et la même qualité que les produits neufs avec l'avantage de prix plus bas, les produits remanufacturés peuvent être sollicités par les clients et donc peuvent détourner la part des ventes des produits neufs. Du point de vue du Remanufacturer, la marge de profit des produits remanufacturés est volatile à cause de la variabilité de l'état des produits retournés engageant des coûts conséquents. En cas de forte cannibalisation des produits neufs par les remanufacturés, les revenus de l'entreprise connaîtront moins de ressources. Ce phénomène est plus visible dans le cas des produits de basse technologie et il est difficile de contrôler la cannibalisation puisqu'elle dépend des préférences et du comportement du consommateur.

Le coût du remanufacturing comprend tous les coûts suivants (Lahrouer et al., 2019) :

- Le coût d'achat du produit usé (généralement sous forme de bon d'achat).
- Le coût de transport 1 (de l'utilisateur au centre du remanufacturing).
- Le coût de la main d'œuvre 1 (désassemblage et inspection)
- Le coût des pièces de rechange
- Le coût de la main d'œuvre 2 (assemblage et nettoyage).
- Le coût de transport 2 (du centre de remanufacturing à l'utilisateur).

La Figure 37 montre les coûts de remanufacturing d'un produit.

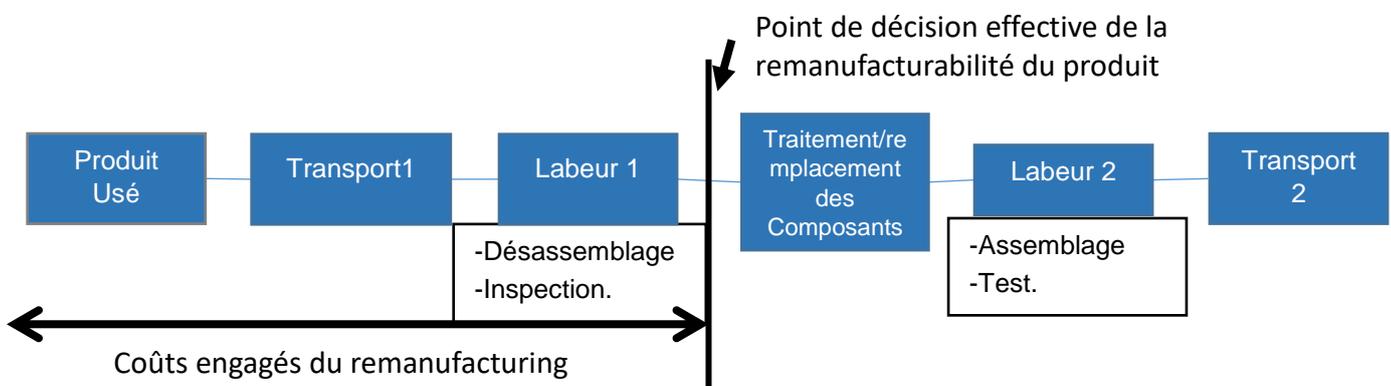


Figure 37 : Le coût du remanufacturing sur les étapes clés du processus

Pour pallier au phénomène de la cannibalisation, le Remanufacturer cherche à optimiser le profit global de son lot de produits neufs et remanufacturés.

Au niveau opérationnel, le coût du remanufacturing dépend fortement de la qualité des produits retournés. La marge du profit d'un produit remanufacturé ne peut être véritablement calculée qu'après contrôle de l'état du produit retourné. Ce qui veut dire que la décision de remanufacturer un produit ou vendre à sa place un produit neuf ne peut être faite de façon déterministe qu'après contrôle de l'état du produit retourné. Ce qui veut dire, que les coûts des étapes avant le contrôle de l'état du produit retourné (logistique inverse, inspection, etc.) sont des coûts engagés et inhérents au coût du produit remanufacturé et doivent être également inclus dans le coût du produit neuf.

La Figure 38 montre les coûts engagés avant décision au niveau opérationnel du remanufacturing du produit retourné et le point de la prise de la décision dans le processus du remanufacturing.

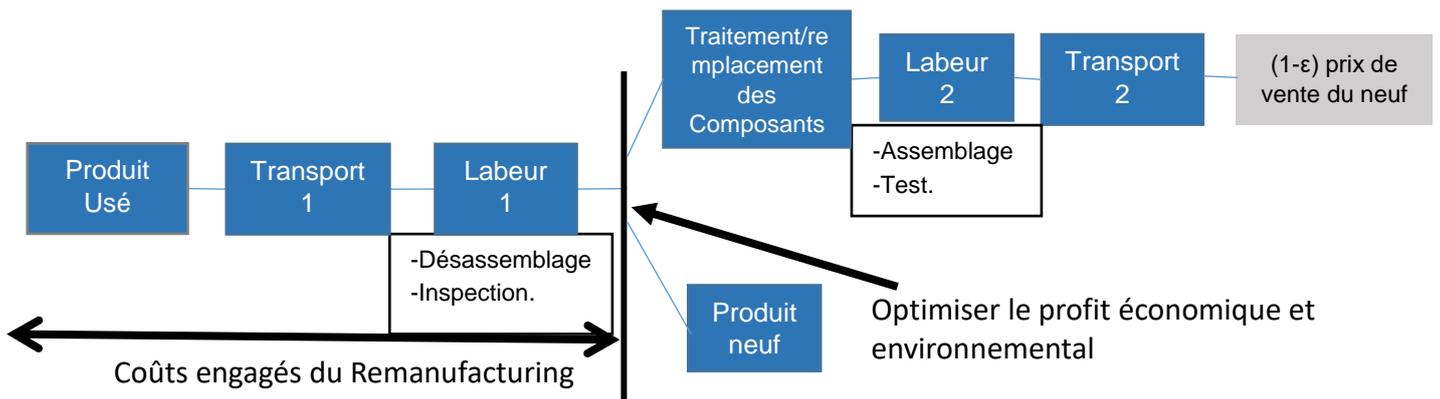


Figure 38 : Les coûts inclus dans le produit neuf et remanufacturé

un outil de décision Go/No-Go au niveau opérationnel qui permet d'aider à la décision pour quel type du produit (remanufacturé ou neuf) le profit économique et l'impact environnemental sont optimaux. Si le profit de la vente du produit neuf est supérieur à celui du produit à remanufacturer, le produit retourné n'a pas à être remanufacturé.

- Le profit d'un produit remanufacturé s'obtient par la formule :

Profit du produit reman

$$= \text{prix de vente du produit reman} - \text{coût du remanufacturing}$$

$$\text{Prix de vente du produit reman} = \text{prix de vente du produit neuf} * \varepsilon$$

$$\text{avec } 0.55 < \varepsilon < 0.8$$

- Le profit d'un produit neuf s'obtient par la formule :

Profit du produit neuf

$$= \text{prix de vente du produit neuf} - \text{coût d'achat de chez le FEO}$$

Nous appliquerons l'outil de décision Go/No-Go de remanufacturing des produits remanufacturés sur des données réelles issues de l'entreprise Aqua sujet de l'étude. Nous évaluerons les profits et les impacts environnementaux des trois scénarios suivants :

- Scénario 1 : Uniquement des produits neufs sont vendus sans activité de remanufacturing chez l'entreprise.
- Scénario 2 : Uniquement des produits remanufacturés sont vendus.
- Scénario 3 : On applique l'outil de décision Go/No-Go. Uniquement le type de produit qui apporte le plus de profit est vendu.

Tableau 18 : Application de l'outil Go/No-Go sur les produits d'Aqua.

| Scénarios | Profit économique (euros) | Marge environnemental épargnée (kg eq CO2) | Lot de produits à vendre |
|---|---------------------------|--|--------------------------|
| Uniquement des produits neufs | 2060,7 | 0 | 26neuf 0rem |
| Uniquement des produits remanufacturés | 1714,97 | 4628 | 0neuf 26rem |
| Application de l'outil de décision Go/No-Go | 2037,3 | 2492 | 12neuf 14rem |

Les résultats de calcul des trois scénarios sont présentés dans le tableau 18. Pour chaque produit retourné, le coût de remanufacturing était calculé puis la marge de profit. La marge de profit du produit remanufacturé est comparée à celle du neuf. De cette comparaison, le produit retourné ne peut être remanufacturé que si sa marge est supérieure ou égale à celle du neuf.

Pour les 26 produits sélectionnés la meilleure marge de profit a été calculée pour le scénario 1 où il y a uniquement une vente de produits neufs. Toutefois, la vente d'un mix des produits remanufacturés et neufs en appliquant l'outil de décision Go/No-go au niveau opérationnel permet de maximiser le profit pour atteindre un profit proche de celui du premier scénario, tout

en permettant un évitement des impacts environnementaux dus à la production du neuf. De plus, l'activité de remanufacturing peut accroître la part de marché de l'entreprise en attirant de nouveaux consommateurs intéressés par les produits verts. Par le présent outil Go/No-Go on ne cherche pas à répondre à cette question mais plutôt à minimiser l'effet de cannibalisation et permettre à l'entreprise un profit vert en optimisant à la fois les gains économiques et environnementaux.

5.4.2 Déduction des coûts économiques et environnementaux à partir des symptômes

La décision sur la remanufacturabilité des produits n'est effective qu'après inspection des produits. Une situation qui entraîne de forts coûts économiques et environnementaux engagés sans garantie de la remanufacturabilité du produit. Ces coûts sont principalement le coût du produit usé, de transport et de labour 1 (désassemblage et inspection). L'évitement de ces coûts nécessite une connaissance de l'état du produit le plus en amont possible (par exemple, avant que l'utilisateur envoie le produit). Afin de pallier à ça, il y a un besoin d'une méthode qui permet de :

- Décider du gain potentiel du remanufacturing du produit utilisé à partir des informations données par l'utilisateur (qui n'est pas forcément connaisseur technique du produit).
- Mettre en lien les symptômes et l'état du produit (les probables défaillances des composants).
- Prédire à partir des symptômes du produit les gains économiques et environnementaux potentiels.
- D'estimer un intervalle continu du pire scénario jusqu'au meilleur scénario des gains économiques et environnementaux du produit en fin d'usage.

La combinaison de la méthode AMDEC pour le remanufacturing proposé en chapitre 3 et l'analyse des coûts économiques et environnementaux du cycle de vie du produit permet de prédire les gains économiques et environnementaux possibles avec une certaine probabilité basée sur la probabilité d'occurrence du mode de défaillance. Figure 39, illustre le résultat de jonction de ces méthodes.

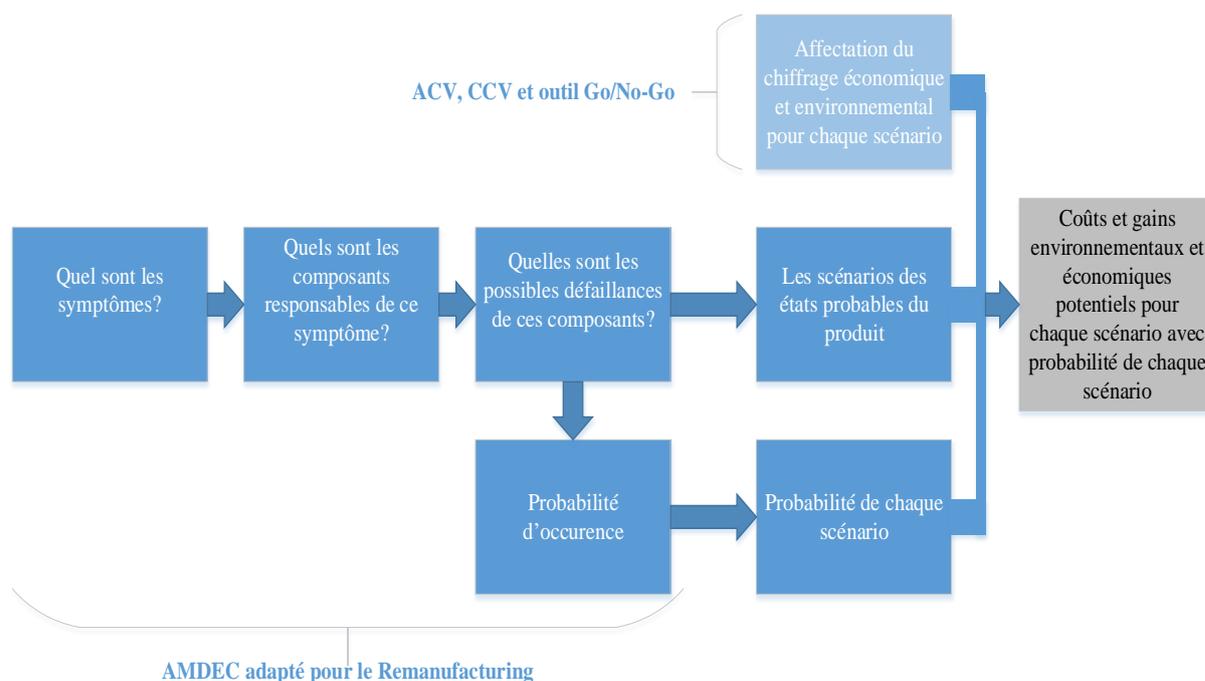


Figure 39 : *Intégration des résultats de l'ACV et CCV dans l'AMDEC pour remanufacturing*

Le tableau 19 montre un exemple de résultat de la combinaison des deux méthodes. A partir d'un symptôme, on obtient le coût environnemental et économique du traitement de la défaillance cause du symptôme avec une probabilité d'occurrence de cette défaillance.

Tableau 19 : *Résultat de des coûts environnementaux et économiques à partir d'un symptôme.*

| Symptômes | Composant responsable | Défaillance possible | Probabilité d'occurrence | Coût personnalisé (euros) | Coût environnemental (kg/CO2 eq) |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Le compresseur ne démarre pas | Kit aimant | Fléchi ou frotté | 9 | 36 | 5,13 |
| | Système de sécurité | Déclenché | 5 | 1,16 | 1,58 |
| | Diaphragme | Déchiré | 9 | 20,52 | 0,343 |
| | Head block | Fuite d'air | 3 | 57,6 | 0,451 |
| | Câbles | Coupé | 1 | 3 | 0,1 |

5.5 Conclusion

Nous avons réalisé dans ce chapitre une ACV du compresseur de l'entreprise Aqua en réalisant une analyse de sensibilité sur la variabilité de l'état des produits retournés. Dans le cas de notre étude même le scénario le plus pessimiste avantage le produit remanufacturé sur le produit neuf en termes d'impacts environnementaux. Nous avons également étudié l'effet possible de cannibalisation des produits neufs par les remanufacturés et nous avons proposé l'outil Go/No-Go qui permet aux indépendants-R de proposer à la vente un lot mixant les produits neufs et remanufacturés afin d'optimiser à la fois les gains économiques et environnementaux. A la fin, nous avons intégré les résultats de chiffrage économique et environnemental à la méthode d'AMDEC pour le remanufacturing proposée en chapitre 3. Cette jonction des deux résultats permet d'anticiper les coûts engagés et de prédire les gains environnementaux et économiques à obtenir d'un produit en fin d'usage à partir des symptômes.

Conclusion générale

Dans ce chapitre nous récapitulerons les contributions phares de ce travail de thèse au vu des questions de recherches exprimées en chapitre 2. Nous discuterons également les résultats obtenus en les positionnant par rapport aux travaux existants. Par la suite, nous éluciderons l'impact de cette thèse sur les praticiens en industrie, les décideurs et les chercheurs. Puis nous mettrons en lumière les limites des propositions de cette étude. Finalement, nous suggérerons de nouvelles perspectives et de futures recherches émanant de ce travail de thèse.

Contributions de la thèse :

L'objectif de ce travail de thèse était, d'abord, d'analyser l'intégration du processus de remanufacturing par une entreprise de vente non-manufacturière et puis de proposer des outils adaptés pour relever les difficultés inhérentes à cette transition dans le cas de ce type d'entreprise. Ce travail s'installe dans le cadre d'une démarche recherche-action, pour construire à la fois, une proposition de connaissances applicables par les praticiens partenaires de ce projet, entreprise Aqua, et une connaissance théorique permettant de remplir l'écart de la littérature autour de la question de recherche générique de ce travail.

« Comment intégrer le processus de Remanufacturing dans les entreprises commerciales dans la perspective de la transition vers l'économie circulaire ? »

Nous avons identifié trois verrous auxquels on a contribué à apporter une réponse afin de débloquer et lever le potentiel économique et environnemental du remanufacturing aspiré par le type de Remanufacturer sous l'étude.

Ce travail de thèse s'articule principalement autour de quatre contributions :

- Identification des caractéristiques pertinentes des types de Remanufacturers ainsi que les motivations et les barrières d'implémentation du remanufacturing pour l'indépendant-R.
- Conception d'une méthode d'inspection de la remanufacturabilité du produit au niveau de décision opérationnel à partir des symptômes en intégrant les indicateurs de l'AMDEC.
- Démarche de re-conception des composants en FdV pour la F.A en processus de remanufacturing, pour la capacité de ce procédé à absorber la variabilité des défaillances en FdV, en se focalisant sur les technologies de F.A les plus adaptées aux caractéristiques du type de Remanufacturers indépendants.
- Analyse environnementale et économique de l'intérêt de remanufacturing du produit Hiblow HP80 de l'entreprise sous l'étude et intégration de ces résultats dans la méthode d'inspection du produit au niveau opérationnel.

Contribution sur les caractéristiques, motivation et barrières des types de Remanufacturers :

Pour répondre à la question de recherche générique sur l'intégration du processus du remanufacturing dans des entreprises commerciales, il a fallu d'abord comprendre et identifier les différentes caractéristiques des types de Remanufacturers. Cette compréhension permet de placer l'entreprise commerciale par rapport aux types de Remanufacturers existants. L'identification des motivations et des barrières suivant les types de Remanufacturers permet de définir les facteurs facilitant et bloquant la transition de l'entreprise commerciale vers l'économie circulaire. Dans cette logique, nous avons proposé dans le premier chapitre de cette thèse les éléments pertinents de cette transition. Nous avons classifié ces éléments en facteurs proactifs économiques, environnementaux et de connaissances techniques du produit et du processus. L'indépendant-R est intéressé par l'impact environnemental réduit des produits remanufacturés qui permettra de verdir son image et de le placer dans un nouveau marché de niche. Néanmoins, le manque de connaissance technique sur le produit à remanufacturer et des technologies à intégrer dans le processus de remanufacturing crée un blocage pour ce type d'entreprise.

Grâce à ces résultats, nous pensons avoir facilité la compréhension des motivations et des barrières de cette transition, et surtout d'avoir identifié les facteurs clés dont il a fallu tenir compte pour définir les leviers garantissant la réussite de l'intégration du remanufacturing dans l'entreprise commerciale.

Comment concevoir un modèle de niveau de décision opérationnel pour l'inspection des produits en fin de vie intégrant les modes de défaillances et les symptômes ?

La littérature et l'analyse de l'étude de cas ont montré un manque de connaissances techniques sur les produits et le processus par l'entreprise commerciale intégrant le remanufacturing. L'analyse de la littérature a identifié également une rareté d'outils de décisions de remanufacturabilité des produits au niveau opérationnel. L'intérêt porté à ce niveau de décision, vient de la volonté de permettre à ce type d'entreprises une rationalisation des coûts économiques et environnementaux en processus de remanufacturing. Ceci, par l'évitement de mauvaises décisions d'acceptation d'un produit non-remanufacturable ou le refus d'un produit remanufacturable. Nous avons proposé une méthode d'inspection qui permet de décider sur la remanufacturabilité du produit le plus tôt possible du processus du remanufacturing. Ceci, permet également d'anticiper les coûts économiques et environnementaux des étapes usuelles avant inspection (transport, stockage, désassemblage). Cette possibilité d'anticipation de

l'inspection est possible grâce à notre proposition originale d'inspection à partir des symptômes du produit en FdV. Pour ceci, nous avons proposé une adaptation de la méthode AMDEC au contexte du remanufacturing. Nous avons utilisé les indicateurs de la méthode pour prédire la probabilité d'occurrence du mode de défaillance à partir du symptôme et pour hiérarchiser les modes de défaillances possibles en fonction de leur criticité et occurrence dans l'inspection. L'exhaustivité de la méthode AMDEC dans l'identification des modes de défaillances répond bien aux caractéristiques de l'entreprise, dans le sens où elle permet l'appropriation du fonctionnement et des dysfonctionnements du produit et de combler le manque de connaissances techniques observé chez ce type d'entreprise.

Comment re-concevoir les composants en fin de vie pour la fabrication additive en processus de Remanufacturing ?

Les résultats de l'application de la méthode AMDEC sur le produit Hiblow HP 80 ont montré un large éventail de modes de défaillance et une variabilité de l'état de FdV des composants. Un processus de remanufacturing principalement basé sur le remplacement des composants non-réutilisables par des pièces de rechange, a montré chez Aqua (entreprise cas de l'étude) pour des composants clés, une déficience économique. De ce constat, nous avons étudié l'implication de la F.A en remanufacturing et nous avons proposé une démarche de re-conception des composants en FdV pour la FA, notamment, la technologie de DFF pour son adéquation pour ce type d'entreprise. La première étape de la démarche de re-conception consiste en l'identification des composants remanufacturables par F.A. Puis, la redéfinition des exigences fonctionnelles et la proposition de prototypes. L'originalité de cette démarche réside dans le fait de proposer une re-conception du composant qui ne consiste pas en la reproduction à l'identique, en forme et volume, du composant mais plutôt consiste en la re-fabrication du composant à partir des exigences fonctionnelles redéfinies à partir du composant original. Cette démarche appliquée sur un composant du produit Hiblow HP 80 a montré une nette amélioration (entre prototypes proposés) dans la satisfaction des exigences fonctionnelles par F.A, tout de même, ses caractéristiques restent loin de celles du produit original, montrant une fragilité du comportement mécanique du composant réalisé par DFF comparé au composant réalisé par injection.

Comment évaluer les bénéfices environnementaux et économiques des produits remanufacturés comparés aux produits neufs face à la large variabilité de l'état des produits en FdV ?

Dans le chapitre 5 nous avons mené une analyse environnementale du produit remanufacturé en évaluant plusieurs cycles d'usage du produit et en intégrant le ratio d'efficacité de remanufacturing des produits retournés. L'analyse de sensibilité a permis d'observer la variabilité des impacts environnementaux en fonction de l'état du produit retourné. Du fait que l'impact environnemental du produit remanufacturé dépend de l'état du produit retourné, notre réponse au niveau de décision opérationnelle face à cette variabilité était d'intégrer les résultats de l'évaluation environnementale dans la méthode d'inspection proposée. Ainsi, cette méthode permet de prédire à partir des symptômes l'impact environnemental du produit une fois remanufacturé.

Vu le type de l'entreprise Aqua, entreprise commerciale, on a décidé d'étudier l'effet d'une possible cannibalisation des produits neufs par les produits remanufacturés. La vente unique des produits remanufacturés, certes, permet de maximiser les bénéfices environnementaux mais réalise une moindre marge économique pour le Remanufacturier. Nous avons proposé une méthode d'optimisation des résultats économiques et environnementaux à partir d'un lot de mix de produits remanufacturés et neufs.

Perspectives et limites :

Les nombreuses contributions de ce travail de thèse connaissent certaines limites. Plusieurs améliorations peuvent être apportées afin de consolider et développer les résultats obtenus :

- Le choix d'une méthodologie de recherche-action, qui est tout à fait adaptée à notre contexte de recherche et justifiée dans le chapitre 2, impose une forte implication du chercheur dans la proposition des solutions et l'assurance de leurs mises en place. Dans ce travail, nous avons fait le choix de proposer des solutions pour l'intégration du remanufacturing par l'entreprise commerciale. Une future possibilité est de mesurer et d'observer cette transition réalisée par l'entreprise afin qu'elle soit reproductible sur d'autres entreprises commerciales. Ceci, en étudiant les paramètres de nature organisationnelle, commerciale ou liés aux acteurs projet par exemple. Afin de permettre une généralisation sûre des résultats économiques et environnementaux obtenus à l'issue de l'application des propositions de ce travail de thèse.
- Le choix de l'adaptation de la méthode AMDEC a été justifié, en partie, par l'exhaustivité de cette méthode et son aspect systématique dans l'inspection des produits. Toutefois, cette exhaustivité peut être une limite dans le cas des produits constitués d'un grand nombre de composants. Nous avons proposé une grille d'inspection pour la

simplification de l'exécution de cette dernière. Toutefois, l'élaboration même de cette grille peut être fastidieuse et complexe dans le cas des produits complexes qui comportent plusieurs états de fonctionnement.

- La méthode d'inspection proposée permet d'identifier la défaillance menant à une défaillance globale impactant le fonctionnement du système (on observe les symptômes). Cette méthode d'inspection ne permet pas d'évaluer ou d'estimer la fiabilité du produit ou le temps jusqu'à la prochaine défaillance par exemple. De futurs travaux sur la fiabilité en remanufacturing peuvent compléter la proposition d'inspection proposée dans ce travail de thèse.
- L'intégration de la fabrication additive en remanufacturing nécessite le développement de méthodes de numérisation des pièces plus précises pour l'obtention automatique des modèles CAO. De plus, on a observé un manque d'études comparant les propriétés mécaniques des pièces obtenues par DFF et les pièces réalisées par injection plastique. Les études dans ce sens peuvent valider l'écart en résistance mécanique entre ces deux types de pièces et elles peuvent proposer des recommandations sur les paramètres d'impression (angle de trame, épaisseur de la couche, orientation de la couche) afin d'optimiser les caractéristiques mécaniques des pièces imprimées (résistance à la traction, la flexion, etc.).
- Les échantillons des produits étudiés dans le cadre de cette thèse n'ont pas permis de réaliser une étude statistique pour proposer un modèle de la variabilité des résultats économiques et environnementaux avec l'état du produit retourné. Par conséquent, Des études statistiques dans ce sens permettront de maîtriser la variabilité des gains économiques et environnementaux en remanufacturing.

Bibliographie

- Abu, M.Y., Jamaludin, K.R., Abdul Sani, A.S., Abdullah, T.A., Wahab, D.A., 2013. An Application of Failure Mode and Effect Analysis to Cylinder Head during Dismantle of Remanufacturing Process: A Case Study. *AMR* 845, 841–851. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.845.841>
- Achillas, C., Tzetzis, D., Raimondo, M.O., 2017. Alternative production strategies based on the comparison of additive and traditional manufacturing technologies. *International Journal of Production Research* 55, 3497–3509. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1282645>
- ADEME, 2018. Modélisation macroéconomique appliquée à l'économie circulaire. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'énergie.
- Allenby, B.R., 1992. Industrial Ecology: The Materials Scientist in an Environmentally Constrained World. *MRS Bulletin* 17, 46–51. <https://doi.org/10.1557/S0883769400040859>
- Amaya Rivas, J.L., 2012. Assessment of the environmental benefits provided by closed-loop strategies for industrial products (These de doctorat). Grenoble.
- AMFG, 2019. FDM 3D Printing: Where Are We Today? AMFG. URL <https://amfg.ai/2019/06/06/fdm-3d-printing-where-are-we-today/> (accessed 11.22.20).
- Andrews, D., Walker, B., 2015. Poisoned legacy. Environmental Working group (EWG).
- Anityasari, M., Kaebernick, H., 2008. A concept of reliability evaluation for reuse and remanufacturing. *International Journal of Sustainable Manufacturing* 1, 3–17. <https://doi.org/10.1504/IJSM.2008.019224>
- Arabian-Hoseynabadi, H., Oraee, H., Tavner, P.J., 2010. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for wind turbines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 32, 817–824. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.01.019>
- Avenier, M.-J., 2011. Les paradigmes épistémologiques constructivistes : post-modernisme ou pragmatisme ? *Management Avenir* n° 43, 372–391.
- Avenier, M.-J., 2009. Franchir un fossé réputé infranchissable : construire des savoirs scientifiques pertinents pour la pratique. *Management Avenir* n° 30, 188–206.
- Bansal, P., Roth, K., 2000. Why Companies Go Green: A Model of Ecological Responsiveness. *AMJ* 43, 717–736. <https://doi.org/10.5465/1556363>
- Barlier, C., Bernard, A., 2015. Fabrication additive, Technique et Ingénierie, Dunod.
- Bauer, T., 2018. Concevoir un produit pour plusieurs vies : Propositions pour la conception et l'évaluation environnementales de solutions en cascade (phdthesis). Université Grenoble Alpes.
- Bayer AG, 2020. Bayer announces agreements to resolve major legacy Monsanto litigation [WWW Document]. Bayer announces agreements to resolve major legacy Monsanto litigation. URL <http://media.bayer.com/baynews/baynews.nsf/id/Bayer-announces-agreements-to-resolve-major-legacy-Monsanto-litigation> (accessed 10.11.20).
- Berry, M.A., Rondinelli, D.A., 1998. Proactive corporate environmental management: A new industrial revolution. *AMP* 12, 38–50. <https://doi.org/10.5465/ame.1998.650515>

- Biswas, W.K., Duong, V., Frey, P., Islam, M.N., 2013. A comparison of repaired, remanufactured and new compressors used in Western Australian small- and medium-sized enterprises in terms of global warming. *Jnl Remanufactur* 3, 4. <https://doi.org/10.1186/2210-4690-3-4>
- Boulding, K., 1966. The Economics of the Coming Spaceship Earth, in: *In Environmental Quality in a Growing Economy*. Henry Jarett, pp. 3–14.
- Boustani, A., Sahni, S., Graves, S.C., Gutowski, T.G., 2010. Appliance remanufacturing and life cycle energy and economic savings, in: *Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology*. Presented at the Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISSST.2010.5507713>
- BP statistical review of world energy, 2010. How long will resources last?
- Bras, B., Hammond, R., 1996. Towards Design for Remanufacturing: Metrics for Assessing Remanufacturing. Presented at the Proceedings of the 1st International Workshop on Reuse, in: S.D. Flapper, A.J. de Ron (Eds).
- Carillo, T.R., 2007. L'éco-conception dans les PME : les mécanismes du cheval de Troie méthodologique et du choix de trajectoires comme vecteurs d'intégration de l'environnement en conception (phdthesis). Université du Sud Toulon Var.
- CDP, 2017. The Carbon Majors Report. Carbon Disclosure Project (CDP) and Climate Accountability Institute (CAI).
- Chomkamsri, K., Wolf, M.-A., Pant, R., 2011. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Review Schemes for Life Cycle Assessment, in: Finkbeiner, M. (Ed.), *Towards Life Cycle Sustainability Management*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 107–117. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1899-9_11
- Cummings, T.G., 2007. Quest for an Engaged Academy. *AMR* 32, 355–360. <https://doi.org/10.5465/amr.2007.24349184>
- DAIMON, T., 2003. Proposal of Decision Support Method for Life Cycle Strategy by Estimating Value and Physical Lifetimes. *Proc. of EcoDesign 2003, the 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing* 109–116.
- Dawoud, M., Taha, I., Ebeid, S.J., 2016. Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques. *Journal of Manufacturing Processes* 21, 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.11.002>
- de Aguiar, J., de Oliveira, L., da Silva, J.O., Bond, D., Scalice, R.K., Becker, D., 2017. A design tool to diagnose product recyclability during product design phase. *Journal of Cleaner Production* 141, 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.074>
- Despeisse, M., Baumers, M., Brown, P., Charnley, F., Ford, S.J., Garmulewicz, A., Knowles, S., Minshall, T.H.W., Mortara, L., Reed-Tsochas, F.P., Rowley, J., 2017. Unlocking value for a circular economy through 3D printing: A research agenda. *Technological Forecasting and Social Change* 115, 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.09.021>
- Du, Y., Cao, H., Liu, F., Li, C., Chen, X., 2012. An integrated method for evaluating the remanufacturability of used machine tool. *Journal of Cleaner Production* 20, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.08.016>
- Ellen Macarthur, 2016a. *Intelligent assets: unlocking the circular economy potential*. Ellen mac arthur foundation.
- Ellen Macarthur, 2016b. *Vers une économie circulaire: arguments économiques pour une transition accélérée*. Ellen Macarthur.
- Ellen Macarthur, Sun, McKinsey, 2015. *Economie circulaire, pour une europe compétitive*. Ellen Macarthur foundation, SUN, McKinsey Center for Business and environment.

- Erkman, S., 2004. L'écologie industrielle : une stratégie pour l'éco-restructuration du système industriel (These de doctorat). Troyes.
- European Remanufacturing Network, 2015. What is Remanufacturing and how does it benefit jobs, the economy and the environment? [WWW Document]. URL <http://www.remanufacturing.eu/about-remanufacturing.php> (accessed 10.11.20).
- Figuière, C., Chebbi, A., 2016. Écologie Industrielle (EI) et Économie Circulaire (EC). Concurrentes ou complémentaires? Presented at the XXXIIèmes journées du développement ATM 2016 "Catastrophes, vulnérabilités et résiliences dans les pays en développement."
- Ford, 2011. Failure Mode and Effects Analysis. FMEA Handbook (with Robustness linkages) (No. 4.2).
- Frosch, R.A., Gallopoulos, N.E., 1989. Strategies for Manufacturing. *Scientific American* 261, 144–153.
- FUSION, 2014. Quelle vision ont les TPE-PME de l'économie circulaire? Observatoire FUSION (KCC, BSK, Cfsd, WSX VOKA, Dnamo, CCI).
- Gehin, A., Zwolinski, P., Brissaud, D., 2009. Integrated design of product lifecycles—The fridge case study. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Life Cycle Engineering* 1, 214–220. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2009.05.002>
- Gell, M., 2008. Carbon Footprints and Ecodesign of Toner Cartridges. Xanfeon Energy & Environmental Services, UK.
- Ghazalli, Z., Murata, A., 2011. Development of an AHP–CBR evaluation system for remanufacturing: end-of-life selection strategy. *International Journal of Sustainable Engineering* 4, 2–15. <https://doi.org/10.1080/19397038.2010.528848>
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., 2015. Development of Additive Manufacturing Technology, in: Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (Eds.), *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer, New York, NY, pp. 19–42. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3_2
- GIEC, 2019. The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.
- Goldey, C.L., Kuester, E., Mummert, R., Okrasinski, T.A., Olson, D., Schaeffer, W.J., 2010. Lifecycle assessment of the environmental benefits of remanufactured telecommunications product within a "green" supply chain, in: *Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology*. Presented at the Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISSST.2010.5507761>
- Goodall, P., Rosamond, E., Harding, J., 2014. A review of the state of the art in tools and techniques used to evaluate remanufacturing feasibility. *Journal of Cleaner Production* 81, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.014>
- Grisel, L., Osset, P., 2005. L'Analyse du Cycle de Vie d'un produit ou d'un service. Applications et mise en pratique. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 4, 234–234.
- Hart, S.L., 1997. Beyond greening: strategies for a sustainable world. *Harvard Business Review* 75, 66–77.
- Hart, S.L., 1995. A Natural-Resource-Based View of the Firm. *AMR* 20, 986–1014. <https://doi.org/10.5465/amr.1995.9512280033>
- Hatcher, G.D., Ijomah, W.L., Windmill, J.F.C., 2013. Design for remanufacturing in China: a case study of electrical and electronic equipment. *Jnl Remanufacture* 3, 3. <https://doi.org/10.1186/2210-4690-3-3>
- HCC, 2020. Maîtriser l'empreinte carbone de la France. Haut Conseil pour le Climat.

- Hedges, M., Calder, N., 2006. Near Net Shape Rapid Manufacture & Repair by LENS(registered trademark). NEOTECH SERVICES MTP NUREMBERG (GERMANY), NEOTECH SERVICES MTP NUREMBERG (GERMANY).
- Hinojos, A., Mireles, J., Reichardt, A., Frigola, P., Hosemann, P., Murr, L.E., Wicker, R.B., 2016. Joining of Inconel 718 and 316 Stainless Steel using electron beam melting additive manufacturing technology. *Materials & Design* 94, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.041>
- Huang, E., Ramamurthy, R., McGinnis, L.F., 2007. System and simulation modeling using SYSML, in: 2007 Winter Simulation Conference. Presented at the 2007 Winter Simulation Conference, pp. 796–803. <https://doi.org/10.1109/WSC.2007.4419675>
- Inderfurth, K., Mukherjee, K., 2008. Decision support for spare parts acquisition in post product life cycle. *cent.eur.j.oper.res.* 16, 17–42. <https://doi.org/10.1007/s10100-007-0041-z>
- INSEE, 2018. Tableaux de l'économie française. Institut National de Statistique et des Etudes Economiques.
- INSEE, 2017. Tableaux de l'économie française. Institut National de Statistique et des Etudes Economiques.
- Institut de l'économie circulaire, 2016. Remanufacturing: Une formidable opportunité pour la France industrielle de demain.
- Intlekofer, K., Bras, B., Ferguson, M., 2010. Energy Implications of Product Leasing. *Environ. Sci. Technol.* 44, 4409–4415. <https://doi.org/10.1021/es9036836>
- ISO 14040, 2006. ISO 14040:2006 [WWW Document]. ISO. URL <https://www.iso.org/cms/render/live/fr/sites/isoorg/contents/data/standard/03/74/37456.html> (accessed 11.12.20).
- Jacobsen, N.B., 2006. Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark: A Quantitative Assessment of Economic and Environmental Aspects. *Journal of Industrial Ecology* 10, 239–255. <https://doi.org/10.1162/108819806775545411>
- Jhavar, S., Paul, C.P., Jain, N.K., 2013. Causes of failure and repairing options for dies and molds: A review. *Engineering Failure Analysis* 34, 519–535. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.09.006>
- Joltreau, E., Sommerfeld, K., 2019. Why does emissions trading under the EU Emissions Trading System (ETS) not affect firms' competitiveness? Empirical findings from the literature. *Climate Policy* 19, 453–471. <https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1502145>
- Jr, V.D.R.G., Li, J., 2010. The Potential for Cannibalization of New Products Sales by Remanufactured Products*. *Decision Sciences* 41, 547–572. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2010.00280.x>
- Jun, H.-B., Lee, D.-H., Kim, J.-G., Kiritsis, D., 2012. Heuristic algorithms for minimising total recovery cost of end-of-life products under quality constraints. *International Journal of Production Research* 50, 5330–5347. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.624562>
- Kamrani, A.K., 2014. Direct laser deposition for re-manufacturing of components. *IEEE*, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/WAC.2014.6935640>
- Kapetanopoulou, P., Tagaras, G., 2011. Drivers and obstacles of product recovery activities in the Greek industry. *International Journal of Operations & Production Management*.
- Kara, H., 2010. Comparative Carbon Footprint Analysis of New and Remanufactured Inkjet Cartridges. Center for Remanufacturing and Reuse.
- Kara-Zaitri, C., Keller, A.Z., Barody, I., Fleming, P.V., 1991. An improved FMEA methodology, in: Annual Reliability and Maintainability Symposium. 1991 Proceedings. Presented at the Annual Reliability and Maintainability Symposium. 1991 Proceedings, pp. 248–252. <https://doi.org/10.1109/ARMS.1991.154443>

- Kianian, B., Tavassoli, S., Larsson, T.C., Diegel, O., 2016. The adoption of additive manufacturing technology in Sweden. *Procedia CIRP* 40, 7–12.
- Kieser, A., Leiner, L., 2009. Why the Rigour–Relevance Gap in Management Research Is Unbridgeable. *Journal of Management Studies* 46, 516–533. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6486.2009.00831.x>
- King, A.M., Burgess, S.C., Ijomah, W., McMahon, C.A., 2006. Reducing waste: repair, recondition, remanufacture or recycle? *Sust. Dev.* 14, 257–267. <https://doi.org/10.1002/sd.271>
- Koenig, H.E., Cantlon, J.E., 1999. Quantitative Industrial Ecology & Ecological Economics. *Journal of Industrial Ecology* 3, 63–83. <https://doi.org/10.1162/108819899569557>
- Korhonen, J., Honkasalo, A., Seppälä, J., 2018. Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics* 143, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Krill, M., Thurston, D.L., 2005. Remanufacturing: Impacts of Sacrificial Cylinder Liners. *J. Manuf. Sci. Eng* 127, 687–697. <https://doi.org/10.1115/1.1961946>
- Kumar, V., Shirodkar, P.S., Camelio, J.A., Sutherland, J.W., 2007. Value flow characterization during product lifecycle to assist in recovery decisions. *International Journal of Production Research* 45, 4555–4572. <https://doi.org/10.1080/00207540701474633>
- Kwak, M., Kim, H., 2017. Green profit maximization through integrated pricing and production planning for a line of new and remanufactured products. *Journal of Cleaner Production* 142, 3454–3470. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.121>
- Lahrou, Y., Brissaud, D., Zwolinski, P., 2019. The strategy for implementing remanufacturing process in a commercial enterprise, the case study of a French company. *Procedia CIRP* 80, 554–559.
- Lam, A., Sherwood, M., Shu, L.H., 2001. FMEA-Based Design for Remanufacture Using Automotive-Remanufacturer Data (SAE Technical Paper No. 2001-01-0308). SAE International, Warrendale, PA. <https://doi.org/10.4271/2001-01-0308>
- Lampe, M., Ellis, S.R., Drummond, C.K., 1991. What Companies are Doing to Meet Environmental Protection Responsibilities: Balancing Legal, Ethical, and Profit Concerns [WWW Document]. Proceedings of the International Association for Business and Society. <https://doi.org/10.5840/iabsproc1991241>
- Le, V.T., Paris, H., Mandil, G., 2017. Process planning for combined additive and subtractive manufacturing technologies in a remanufacturing context. *Journal of Manufacturing Systems* 44, 243–254. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.06.003>
- Lefèvre, M., 2004. Les firmes multinationales face au risque climatique : sauver le capital en sauvant la terre? *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*. <https://doi.org/10.4000/vertigo.3549>
- Leino, M., Pekkarinen, J., Soukka, R., 2016. The role of laser additive manufacturing methods of metals in repair, refurbishment and remanufacturing - enabling circular economy, in: Schmidt, M., Vollertsen, F., Arnold, C.B. (Eds.), *Laser Assisted Net Shape Engineering 9 International Conference on Photonic Technologies Proceedings of the Lane 2016*. Elsevier Science Bv, Amsterdam, pp. 752–760.
- Lewis, S.R., Lewis, R., Fletcher, D.I., 2015. Assessment of laser cladding as an option for repairing/enhancing rails. *Wear* 330–331, 581–591. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.027>
- Lloyd, S.M., Ries, R., 2007. Characterizing, Propagating, and Analyzing Uncertainty in Life-Cycle Assessment: A Survey of Quantitative Approaches. *Journal of Industrial Ecology* 11, 161–179. <https://doi.org/10.1162/jiec.2007.1136>

- Lomax, W., Hammond, K., East, R., Clemente, M., 1997. The measurement of cannibalization. *Journal of Product and Brand Management* 6, 27–39. <https://doi.org/10.1108/10610429710160011>
- Lund, R.T., 1985. Remanufacturing : the experience of the United States and implications for developing countries [WWW Document]. URL [/paper/Remanufacturing-%3A-the-experience-of-the-United-and-Lund/c87a1a1b114edd20daf54037433182a6d3ce1e28](http://paper/Remanufacturing-%3A-the-experience-of-the-United-and-Lund/c87a1a1b114edd20daf54037433182a6d3ce1e28) (accessed 10.11.20).
- Mandil, G., Le, V.T., Paris, H., Suard, M., 2016. Building new entities from existing titanium part by electron beam melting: microstructures and mechanical properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 85, 1835–1846. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8049-3>
- Matsumoto, M., W. Ijomah, 2013. Remanufacturing, in: *Handbook of Sustainable Engineering*. pp. 389–408.
- Matsumoto, M., Yang, S., Martinsen, K., Kainuma, Y., 2016. Trends and research challenges in remanufacturing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 3, 129–142. <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0016-4>
- McConocha, D.M., T.W. SPEh, 1991. Remarketing: Commercialization of remanufacturing technology. *Journal of Business & Industrial Marketing* 6, 23–37. <https://doi.org/10.1108/08858629110035275>
- Meadows, Donella, H., Dennis, L., Randers, J., Behrens, W., 1972a. *The Limits to Growth*. Univers Books, New york 9.
- Nicklaus, D., Rouquet, R., 2014. *Comparaison internationale des politiques publiques en matière d'économie circulaire. Etudes et Documents (CGDD), Paris*.
- Obaton, A.-F., BERNARD, A., TAILLANDIER, G., MOSCHETTA, J.-M., 2015. Additive manufacturing: state of the art and generated metrological needs. *Revue française de métrologie* 2015–1, 21–36.
- Pandey, V., Thurston, D., 2009. Variability and Component Criticality in Component Reuse and Remanufacturing Systems. Presented at the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, pp. 953–961. <https://doi.org/10.1115/DETC2007-35671>
- Parker, D., Riley, K., Robinson, S., Symington, H., Teweson, J., Jansson, K., Ramkumar, S., Peck, D., 2015. *Remanufacturing Market Study* 146.
- Peters, K., 2016. Methodological issues in life cycle assessment for remanufactured products: a critical review of existing studies and an illustrative case study. *Journal of Cleaner Production* 126, 21–37. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.050>
- Plevin, R.J., Delucchi, M.A., Creutzig, F., 2014. Using Attributional Life Cycle Assessment to Estimate Climate-Change Mitigation Benefits Misleads Policy Makers. *Journal of Industrial Ecology* 18, 73–83. <https://doi.org/10.1111/jiec.12074>
- Pochampally, K.K., Gupta, S.M., 2004. A business-mapping approach to multi-criteria group selection of collection centers and recovery facilities, in: *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2004. Conference Record. 2004. Presented at the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2004. Conference Record. 2004*, pp. 249–254. <https://doi.org/10.1109/ISEE.2004.1299724>
- Rahito, Wahab, D.A., Azman, A.H., 2019. Additive Manufacturing for Repair and Restoration in Remanufacturing: An Overview from Object Design and Systems Perspectives. *Processes* 7, 802. <https://doi.org/10.3390/pr7110802>
- Rickli, J.L., Dasgupta, A.K., Dinda, G.P., 2014. A descriptive framework for additive remanufacturing systems. *International Journal of Rapid Manufacturing* 4, 199. <https://doi.org/10.1504/IJRAPIDM.2014.066043>

- Ross, S., Evans, D., Webber, M., 2002. How LCA studies deal with uncertainty. *Int J LCA* 7, 47. <https://doi.org/10.1007/BF02978909>
- Rozenfeld, H., Barquet, A.P., 2013. A Brazilian perspective on remanufacturing. <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-4625>
- Russo, D., Birolini, V., Ceresoli, R., 2016. FIT: A TRIZ Based Failure Identification Tool for Product-Service Systems. *Procedia CIRP, Product-Service Systems across Life Cycle* 47, 210–215. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.087>
- Saavedra, Y.M.B., Barquet, A.P.B., Rozenfeld, H., Forcellini, F.A., Ometto, A.R., 2013. Remanufacturing in Brazil: case studies on the automotive sector. *Journal of Cleaner Production* 53, 267–276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.038>
- Seitz, M.A., 2007. A critical assessment of motives for product recovery: the case of engine remanufacturing. *Journal of Cleaner Production, The Automobile Industry & Sustainability* 15, 1147–1157. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.05.029>
- Stamatis, D.H., 2003. *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*. Quality Press.
- Stevens, C., 1994. Interpreting the Polluter Pays Principle in the Trade and Environment Context. *Cornell Int'l L. J.* 27, 577.
- Subramoniam, R., Huisingh, D., Chinnam, R.B., 2009. Remanufacturing for the automotive aftermarket-strategic factors: literature review and future research needs. *Journal of Cleaner Production* 17, 1163–1174. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.03.004>
- Sundin, E., 2004. *Product and Process Design for Successful Remanufacturing*.
- Sundin, E., Lee, H.M., 2012. In what way is remanufacturing good for the environment?, in: Matsumoto, M., Umeda, Y., Masui, K., Fukushige, S. (Eds.), *Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 552–557. https://doi.org/10.1007/978-94-007-3010-6_106
- The Macroeconomics of the Circular Economy Transition: A Critical Review of Modelling Approaches (OECD Environment Working Papers No. 130), 2018. <https://doi.org/10.1787/af983f9a-en>
- Tolio, T., Bernard, A., Colledani, M., Kara, S., Seliger, G., Duflou, J., Battaia, O., Takata, S., 2017. Design, management and control of demanufacturing and remanufacturing systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66, 585–609. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.001>
- Tsiliyannis, C.A., 2017. Real-time identification of mean retention time and end-of-life rate in cyclic manufacturing. *Journal of Cleaner Production* 140, 1553–1566. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.218>
- Turner, R.K., Pearce, D.W., 1990. *THE ETHICAL FOUNDATIONS OF SUSTAINABLE ECONOMIC DEVELOPMENT* 1.
- United Nations, 2015. Sustainable development goals.
- US EPA, O., 2015. Learn About Volkswagen Violations [WWW Document]. US EPA. URL <https://www.epa.gov/vw/learn-about-volkswagen-violations> (accessed 10.11.20).
- Vayre, B., Vignat, F., Villeneuve, F., 2012. Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mech. Ind.* 13, 89–96. <https://doi.org/10.1051/meca/2012003>
- Von Glasersfeld, E., 1988. Constructivism as a Scientific Method. *Scientific Reasoning Research Institute Newsletter* 3, 8–9.
- Voss, V., 1999. Research Methodology in operation management, in: *Eden Seminar*, Brussels, February.
- Wei, S., Cheng, D., Sundin, E., Tang, O., 2015. Motives and barriers of the remanufacturing industry in China. *Journal of Cleaner Production* 94, 340–351. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.014>

- Wilson, J.M., Piya, C., Shin, Y.C., Zhao, F., Ramani, K., 2014. Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis. *Journal of Cleaner Production* 80, 170–178.
- Wits, W.W., García, J.R.R., Becker, J.M.J., 2016. How Additive Manufacturing Enables more Sustainable End-user Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) Strategies. *Procedia CIRP*, 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing – Decoupling Growth from Resource Use 40, 693–698. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.156>
- Zanghelini, G.M., Cherubini, E., Orsi, P., Soares, S.R., 2014. Waste management Life Cycle Assessment: the case of a reciprocating air compressor in Brazil. *Journal of Cleaner Production* 70, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.034>
- Zhang, Y., Yang, Z., He, G., Qin, Y., Zhang, H., 2015. Remanufacturing-Oriented Geometric Modelling for the Damaged Region of Components. *Procedia CIRP* 29, 798–803. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.164>
- Zhou, J., Huang, P., Zhu, Y., Deng, J., 2012. A quality evaluation model of reuse parts and its management system development for end-of-life wheel loaders. *Journal of Cleaner Production* 35, 239–249. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.037>
- Zhou, W., Piramuthu, S., 2013. Remanufacturing with RFID item-level information: Optimization, waste reduction and quality improvement. *International Journal of Production Economics* 145, 647–657. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.05.019>
- Zou, Z.-B., Wang, J.-J., Deng, G.-S., Chen, H., 2016. Third-party remanufacturing mode selection: Outsourcing or authorization? *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 87, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.12.008>
- Zwolinski, P., Lopez-Ontiveros, M.-A., Brissaud, D., 2006. Integrated design of remanufacturable products based on product profiles. *Journal of Cleaner Production* 14, 1333–1345. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.11.028>

Annexes

Annexe – chapitre 3**Annexe I. 1 : Nomenclature du produit HP80**

| Composant | Nombre | Code |
|------------------------------------|---------------|-------------|
| Boîtier avec orifice d'échappement | 1 | BH-0 |
| Joint d'étanchéité | 1 | BH-1 |
| Alimentation électrique | 1 | W-1 |
| Câble interne | - | W-2 |
| Partie haute du boîtier | 1 | UH-0 |
| Vis partie haute du boîtier | 4 | UH-1 |
| Boîtier du filtre | 1 | UH-2 |
| Joint du boîtier du filtre | 2 | UH-3 |
| Filtre | 1 | FT |
| Vis du boîtier du filtre | 1 | UH-4 |
| Axe de montage | 1 | UH-5 |
| Absorbeur de bruit | 1 | SA |
| Bloc supérieur | 2 | HB-0 |
| Vis du bloc supérieur | 8 | HB-1 |
| Tube-L | 2 | LT-0 |
| Clip de serrage des tuyaux | 2 | LT-1 |
| Bloc de diaphragme | 2 | DB-0 |
| Base de diaphragme | 2 | DB-1 |
| Diaphragme | 2 | DB-2 |
| Anneau diaphragme | 2 | DB-3 |
| Rondelle | 2 | DB-4 |
| Ecrou U-lock | 2 | DB-5 |
| Kit aimant | 1 | MR |
| Noyau d'électro-aimant | 2 | EM-1 |
| Bobinage électro-aimant | 2 | EM-2 |
| Plaque centrale | 1 | ST-1 |
| Cadre | 1 | ST-2 |
| Silent blocks | 4 | ST-3 |
| Vis de mécanisme de sécurité | 2 | SM-0 |
| Poutre de support | 1 | SM-1 |
| Vis de la poutre de support | 4 | SM-2 |
| Levier de sécurité | 1 | SM-3 |
| Electrode | 1 | SM-4 |
| Vis d'électrode | 1 | SM-5 |
| Tuyau-L en caoutchouc | 1 | RH-0 |
| Clip de serrage des tuyaux | 2 | RH-1 |

Annexe I. 2 : Classification des sous-ensembles du produit HP80

| Composant | Code | Sous-système | Fonctions | Commentaire |
|------------------------------------|------|-----------------------------------|--|--|
| Boîtier avec orifice d'échappement | BH-0 | Structure | Collecter et guider l'air vers l'orifice | Doit résister à la pression, doit être isolé (pas de fuite d'air) et doit permettre un écoulement fluide de l'air compressé. |
| Joint d'étanchéité | BH-1 | Structure | Empêcher les fuites entre le boîtier supérieur et le boîtier inférieur | – |
| Alimentation électrique | W-1 | Système d'alimentation en énergie | Alimenter le système en courant continue. | – |
| Câble interne | W-2 | Système d'alimentation en énergie | Connecter le secteur avec les composants électriques | – |
| Partie haute du boîtier | UH-0 | Structure | Protéger les composants internes et canaliser le flux d'air d'entrée. | – |
| Vis partie haute du boîtier | UH-1 | Structure | Maintenir le boîtier supérieur et inférieur et le joint d'étanchéité | – |
| Boîtier du filtre | UH-2 | structure | Maintenir le filtre en bonne position | – |
| Joint du boîtier du filtre | UH-3 | structure | Empêcher les fuites | – |
| Filtre | FT | Unité du flux d'air | Filtrer l'air des particules solides | |
| Vis du boîtier du filtre | UH-4 | structure | Maintenir le boîtier du filtre attaché | |
| Axe de montage | UH-5 | structure | Supporter la vis de sécurité | |
| Absorbeur de bruit | SA | structure | Absorber les bruits des composants internes. | Principalement le bruit du kit aimant |
| Bloc supérieur | HB-0 | Unité de compression | Contenir un volume d'air constant qui sera compressé | Permettre l'entrée et la sortie de cet air/ pouvoir supporter la pression |
| Vis du bloc supérieur | HB-1 | Unité de compression | Maintenir le bloc supérieur, le diaphragme et cadre attachés | |

| | | | | |
|------------------------------|------|----------------------|---|---|
| Tube-L | LT-0 | Unité de flux | Permettre la circulation de l'air comprimé du bloc supérieur au boîtier BH-0 | |
| Clip de serrage des tuyaux | LT-1 | Unité de flux | Maintenir la circonférence du tuyau attachée | Résiste à la pression et empêche les fuites |
| Bloc de diaphragme | DB-0 | Unité de compression | Permet la réduction du volume dans HB-0 afin de comprimer l'air | Sous-système |
| Base de diaphragme | DB-1 | Unité de compression | Supporte DB-0 | – |
| Diaphragme | DB-2 | Unité de compression | Permet le mouvement du kit aimant et la réduction du volume dans HB-0 afin de comprimer l'air | – |
| Anneau diaphragme | DB-3 | Unité de compression | | – |
| Rondelle | DB-4 | Unité de compression | Augmente la surface de contact | – |
| Ecrou U-lock | DB-5 | Unité de compression | Maintenir le kit aimant fixe au diaphragme | – |
| Kit aimant | MR | Unité d'entraînement | Transmettre l'énergie magnétique en énergie mécanique et transmettre cette dernière au diaphragme | – |
| Noyau d'électro-aimant | EM-1 | Unité d'entraînement | Concentrer le champ magnétique créé par le bobinage | – |
| Bobinage électro-aimant | EM-2 | Unité d'entraînement | Créer un champ magnétique à partir du courant électrique | – |
| Plaque centrale | ST-1 | Structure | Supporter les composants | – |
| Cadre | ST-2 | Structure | Supporter l'électro-aimant et l'unité de compression | – |
| Silent blocks | ST-3 | Structure | Absorber les vibrations qui passent à travers le cadre | – |
| Vis de mécanisme de sécurité | SM-0 | Sécurité | Eteindre le compresseur au cas où l'amplitude du mouvement du kit aimant est excessive | – |
| Poutre de support | SM-1 | Sécurité | Supporter le mécanisme de sécurité | – |
| Vis de la poutre de support | SM-2 | Sécurité | Maintenir le mécanisme de sécurité attaché au cadre | – |

| | | | | |
|----------------------------|------|---------------|---|---|
| Levier de sécurité | SM-3 | Sécurité | Détecter un mouvement excessif du kit aimant et glisser à la position de sécurité | – |
| Electrode | SM-4 | Sécurité | Eteindre le compresseur | – |
| Vis d'électrode | SM-5 | Sécurité | Maintenir l'électrode attachée à la poutre de support | – |
| Tuyau-L en caoutchouc | RH-0 | Unité de flux | Permettre l'air compressé d'échapper du compresseur | – |
| Clip de serrage des tuyaux | RH-1 | Unité de flux | Maintenir la circonférence du tuyau attachée | Résiste à la pression et empêche les fuites |

Annexe I. 3 : Rapport des modes de défaillances

| Numéro du mode de défaillance | Type d'élément | Type/Composant | Mode de défaillance | Effet | Effet sur le flux principal |
|-------------------------------|----------------------|------------------------------|---|--|-----------------------------|
| 1 | Entrée du système | manuel | Le câble n'est pas branché | Pas de démarrage du compresseur | Interruption totale |
| 2 | Entrée du système | électrique | Le secteur ne fournit pas de courant. | Pas de démarrage | Interruption totale |
| | | | La prise de courant est endommagée. | | |
| 3 | Composant | Système d'alimentation | Le câble est coupé. | Pas de démarrage | Interruption totale |
| | | | Les fils sont corrodés | Courant électrique plus faible | Interruption partielle |
| 4 | Connexion | électrique | Coupure de la connexion entre les câbles | Pas de démarrage | Interruption totale |
| 5 | Composant | Câblage interne | Fils coupés | Pas de démarrage | Interruption totale |
| | | | Fils corrodés | Courant électrique plus faible | Interruption partielle |
| 6 | Composant | Bobinage de l'électro-aimant | Une mauvaise connexion du bobinage | Pas de champ magnétique/ pas de démarrage | Interruption totale |
| | | | Le bobinage est corrodé | Courant électrique plus faible | Interruption partielle |
| 7 | Composant | électrode | L'électrode est cassée | Pas de démarrage | Interruption totale |
| 8 | Composant | Lever de sécurité/vis | Lever de sécurité activé | Pas de démarrage | Interruption totale |
| | | | Lever de sécurité cassé | | |
| 9 | Connexion auxiliaire | Electrique | Mauvaise connexion entre le câblage interne | Pas de démarrage | Interruption totale |

| | | | | | |
|----|----------------------|-------------------------------|---|--|----------------------------------|
| | | | Les fils sont corrodés | Courant électrique plus faible | Interruption partielle |
| 10 | Composant | Poutre de système de sécurité | La poutre du support est cassée ou déformé | Système de sécurité pas fixé/ Pas de démarrage | Interruption totale |
| 11 | Composant | Cadre | Le cadre déformé ou cassé | Kit aimant et l'électro-aimant non aligné et le compresseur ne démarre pas | Interruption totale |
| | | | | Kit aimant et l'électro-aimant non aligné et le compresseur fonctionne mal | Interruption partielle |
| 12 | Connexion auxiliaire | mécanique | SM-4/SM-3/SM-1/SM-5/SM-0/ST-2 pas attachés ou mal alignés | Possible activation du système de sécurité/ Interruption électrique/ Pas de démarrage. | Interruption totale |
| 13 | Composant | Noyau de l'électro-aimant | Le noyau de l'électro-aimant est cassé | Absence ou faible champ magnétique/ Pas de démarrage ou faible pression | Interruption totale ou partielle |
| 14 | Composant | Kit aimant | Kit aimant a fléchi (contact avec l'électro-aimant) | Pas de démarrage | Interruption totale |
| | | | | Compresseur démarre mais bruit et faible pression de l'air | Pas d'interruption totale |
| 15 | Composant | Bloc supérieur | Cassé ou déformé | Fuite d'air/Absence ou faible air | Interruption totale ou partielle |
| | | | Un dépôt important de poussière | Absence ou faible air | Interruption totale ou partielle |
| | | | De valves cassées | | |

| | | | | | |
|----|----------------------|----------------------------|--|--------------------------------|----------------------------------|
| 16 | Composant | Bloc diaphragme | Diaphragme cassé ou troué | Absence ou faible air | Interruption totale ou partielle |
| | | | Usure du diaphragme (couleur devient claire) | Sorite faible de l'air | Interruption partielle de l'air |
| 17 | Connexion | Mécanique | Kit aimant mal fixé avec le diaphragme | Absence ou faible air | Interruption totale ou partielle |
| 18 | Connexion auxiliaire | Mécanique | ST-2/DB-0/MR mal attaché ou mal aligné | Absence ou faible air | Interruption totale ou partielle |
| 19 | Composant | Boitier du filtre | Cassé ou déformé | Obstruction d'air | Interruption totale ou partielle |
| | | | | Fuite d'air/dépôt de poussière | |
| 20 | Composant | Joint du boitier du filtre | Usé ou coup | Fuite d'air/dépôt de poussière | Interruption totale ou partielle |
| 21 | Composant | Boitier supérieur | Cassé u déformé | Fuite d'air/dépôt de poussière | Interruption totale ou partielle |
| 22 | Composant | Filtre | Le filtre est déchiré | Fuite d'air/dépôt de poussière | Interruption totale ou partielle |
| | | | Dépôt excessif de poussière et obstruction des pores | | |
| 23 | Connexion auxiliaire | Mécanique | UH-2/UH-3/FT/HB-0 mal aligné ou mal attaché | Fuite d'air/dépôt de poussière | Interruption totale ou partielle |
| 24 | Composant | Absorbeur de bruit | Cassé ou détérioré | Bruit | Pas d'interruption |
| 25 | Composant | Plaque centrale | Cassé ou déformé | Absence ou faible air | Interruption totale ou partielle |

| | | | | | |
|----|----------------------|-------------------|---|---------------------------------|----------------------------------|
| 26 | Composant | Joint | déchiré | Absence ou faible air | Interruption totale ou partielle |
| 27 | Connexion | Mécanique | Joint, boîtier supérieur et plaque centrale mal aligné ou mal attaché | Absence ou faible air | Interruption totale ou partielle |
| 28 | Composant | Silent block | Cassé ou détérioré | Vibrations | Pas d'interruption |
| | | | | Pas de support | Interruption totale ou partielle |
| 29 | Composant | Tubes-L | Déchiré ou troué | Fuite d'air/ dépôt de poussière | Interruption totale ou partielle |
| 30 | Composant | Boîtier supérieur | Cassé ou déformé | Fuite d'air/ dépôt de poussière | Interruption totale ou partielle |
| 31 | Connexion auxiliaire | Mécanique | UH-0/BH-1/LT-0/BH-0 mal aligné ou mal attaché | Fuite d'air/ dépôt de poussière | Interruption totale ou partielle |

Annexe I. 4 : Calcul des indices de Priorité du Risque

| Num | Gra | Occ | Det | IPR1 | IPR2 | Gra* | IPR |
|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 1 | 3 | 8 | 8 | 3 | 64 | 10 | 640 |
| 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 10 | 20 |
| | 3 | 2 | 5 | 3 | 10 | 10 | 100 |
| 3 | 3 | 4 | 5 | 3 | 20 | 10 | 200 |
| 4 | 3 | 6 | 5 | 3 | 30 | 10 | 300 |
| 5 | 3 | 6 | 5 | 3 | 30 | 10 | 300 |
| | 3 | 3 | 3 | 3 | 9 | 10 | 90 |
| 6 | 3 | 5 | 4 | 3 | 20 | 10 | 200 |
| | 3 | 6 | 6 | 3 | 36 | 10 | 360 |
| 7 | 3 | 2 | 3 | 3 | 6 | 10 | 60 |
| 8 | 3 | 7 | 9 | 3 | 63 | 10 | 630 |
| | 3 | 5 | 7 | 3 | 35 | 10 | 350 |
| 9 | 3 | 6 | 5 | 3 | 30 | 10 | 30 |
| | 3 | 6 | 4 | 3 | 24 | 10 | 240 |
| 10 | 3 | 3 | 6 | 3 | 18 | 10 | 180 |
| 11 | 1-3 | 3 | 6 | 1-3 | 18 | 1-10 | 18-180 |
| 12 | 3 | 5 | 5 | 3 | 25 | 10 | 250 |
| 13 | 3 | 2 | 3 | 3 | 6 | 10 | 60 |
| 14 | 3 | 9 | 9 | 3 | 81 | 10 | 810 |
| | 3 | 8 | 8 | 3 | 64 | 10 | 640 |
| 15 | 2-3 | 3 | 7 | 2-3 | 21 | 5-10 | 105-210 |
| | 2 | 5 | 5 | 2 | 25 | 5 | 125 |
| | 2 | 6 | 3 | 2 | 18 | 5 | 90 |
| 16 | 3 | 9 | 7 | 3 | 63 | 10 | 630 |
| | 2 | 9 | 7 | 2 | 63 | 5 | 315 |
| 17 | 3 | 6 | 6 | 3 | 36 | 5 | 360 |
| 18 | 3 | 5 | 5 | 3 | 25 | 10 | 250 |
| 19 | 2 | 3 | 7 | 2 | 21 | 5 | 105 |
| 20 | 2 | 7 | 8 | 2 | 56 | 5 | 280 |
| 21 | 2 | 3 | 7 | 2 | 21 | 5 | 105 |
| 22 | 2 | 5 | 9 | 2 | 45 | 5 | 225 |
| | 2 | 8 | 9 | 2 | 72 | 5 | 360 |
| 23 | 2 | 5 | 5 | 2 | 25 | 5 | 125 |
| 24 | 1 | 7 | 9 | 1 | 63 | 1 | 63 |
| 25 | 2 | 3 | 7 | 2 | 21 | 5 | 105 |
| 26 | 2 | 6 | 4 | 2 | 24 | 5 | 120 |
| 27 | 2 | 6 | 4 | 2 | 24 | 5 | 120 |
| 28 | 1 | 4 | 5 | 1 | 20 | 1 | 20 |
| 29 | 2 | 6 | 7 | 2 | 42 | 5 | 210 |
| 30 | 2 | 3 | 6 | 2 | 18 | 5 | 90 |
| 31 | 2 | 6 | 7 | 2 | 42 | 5 | 210 |

Annexe I. 5 : Données issues de l'atelier d'inspection des compresseurs HP80 retournés

| Compresseur retourné | Symptômes | Défaillances | Déteçtabilité |
|----------------------|---------------------------------|--|---------------|
| 1 | Pression d'air faible | Usure du diaphragme | élevé |
| 2 | Pression d'air faible | Usure du diaphragme | élevé |
| 3 | Pas de démarrage du compresseur | Electro-aimant déconnecté, kit aimant fléchi | Faible, élevé |
| 4 | Pas de démarrage du compresseur | kit aimant fléchi | élevé |
| 5 | Pression d'air faible | Diaphragme usé | élevé |
| 6 | Pression d'air faible | Diaphragme usé | élevé |
| 7 | Pas de démarrage du compresseur | Base de diaphragme cassé, bloc de diaphragme cassé | élevé |
| 8 | Pas de démarrage du compresseur | kit aimant fléchi, Base de diaphragme cassé | élevé |
| 9 | Pas de démarrage du compresseur | Levier de sécurité activé, kit aimant fléchi, bloc de diaphragme cassé | élevé |
| 10 | Pas de démarrage du compresseur | Levier de sécurité activé, kit aimant fléchi, bloc de diaphragme cassé | élevé |
| 11 | Pas de démarrage du compresseur | Câblage interne coupé | élevé |
| 12 | Pas de démarrage du compresseur | L'électro-aimant brûlé | élevé |
| 13 | Pression d'air faible | Diaphragme usé | élevé |
| 14 | Pas de démarrage du compresseur | Bloc diaphragme cassé | Elevé |
| 15 | Pression d'air faible | Diaphragme usé | élevé |
| 16 | Pas de démarrage du compresseur | Câblage interne coupé | élevé |
| 17 | Pression d'air faible | Filtre obstrué | élevé |
| 18 | Pas de démarrage du compresseur | L'électro-aimant brûlé | élevé |
| 19 | Pas de démarrage du compresseur | Le levier de sécurité activé | élevé |
| 20 | Pas de démarrage du compresseur | Câblage interne coupé | élevé |

| | | | |
|----|---|--|-------|
| 21 | Pas de démarrage du compresseur | L'électro-aimant brulé | élevé |
| 22 | Démarrage du compresseur mais présence du bruit | Silentbloc usé | élevé |
| 23 | Pas de démarrage du compresseur | Le levier de sécurité activé | élevé |
| 24 | Pression d'air faible | Joint déchiré (dépôt de poussière et du gras sur les parois) | élevé |

Annexe I. 6 : Grille de diagnostic

| SYMPTÔMES | DIAGNOSTIQUE | | CORRECTION |
|-------------------------------|--|---|---|
| | Défaillances | A vérifier | |
| COMPRESSEUR NE DEMARRE PAS | Kit aimant courbé ou usé | La rectitude et la surface de la pièce | Réparer/Remplacer le kit aimant |
| | Compresseur n'est pas branché | Prise de courant | Brancher le compresseur |
| | Système de sécurité activé | Vérification visuelle | Retourner à la position correcte |
| | Diaphragme/anneau cassés | Intégrité du diaphragme | Remplacer le kit |
| | Coupure de connexion entre le câblage interne et l'électro-aimant | Vérifier la connexion. Vérifier le courant avec le multimètre | Remettre la connexion |
| | Bobinage électro-aimant corrodé | Vérifier le courant avec le multimètre | Réparer/Remplacer électro-aimant, bobinage |
| | Kit aimant et membrane mal attachés | Vérifier la liaison | Attacher correctement |
| | Connexion enlevé entre l'alimentation électrique et le câblage interne | Vérifier la connexion. Vérifier le courant avec le multimètre | Réparer la connexion |
| | Système de sécurité non attaché mécaniquement | Vérifier la régularité et les vis | Réparer/Remplacer le support de système de sécurité |
| | Kit aimant pas bien attaché à la membrane, cadre | Vérifier la régularité et les vis | Rattacher ou remplacer/réparer composants |
| | Système de sécurité pas bien branché | Vérifier connexion. Vérifier courant avec multimètre | Remettre la connexion |
| | Membrane cassé | Vérification visuelle | Remplacer membrane |
| | Interruption de l'alimentation électrique | Vérifier le courant avec le multimètre | Réparer l'interruption |
| | Pas de connexion bobinage de l'électro-aimant | Vérifier courant avec le multimètre | Réparer/Remplacer bobinage |
| | Interruption électrique dans le câblage interne | Vérifier le courant avec le multimètre | Réparer l'interruption |

• Grille de diagnostic suite (2/3)

| SYMPTOME | DIAGNOSTIC | | CORRECTION NECESSAIRE |
|---|---|--|--|
| | DEFAILLANCE | A VERIFIER | |
| COMPRESSEUR NE DEMARRE PAS | Poutre du support du système de sécurité cassé/déformé | Vérifier la régularité et les vis | Réparer/Remplacer poutre du support |
| | Domage structurel dans le cadre | Vérifier la régularité et la condition du métal | Répare/Remplacer le cadre |
| | Prise de courant endommagé | Vérifier le courant avec le multimètre | Réparer ou remplacer la prise de courant |
| | Electrode défectueux ou cassé | Vérifier avec le multimètre | Réparer/Remplacer l'électrode |
| | Corps de l'électro-aimant cassé ou hors position | Vérifier visuellement | Réparer/Remplacer le corps de l'électro-aimant |
| | Déconnexion électrique du système de sécurité | Vérifier le courant avec le multimètre | Réparer la connexion |
| | Pas de voltage | Vérifier le courant avec le multimètre | Changer la prise de courant |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| COMPRESSEUR DEMARRE MAIS ABSENCE OU FAIBLE PRESSION D'AIR A LA SORTIE | Filtre obstrué | Retirer et vérifier la couleur du filtre | Nettoyer ou remplacer le filtre |
| | Membrane cassé ou usé | Vérification visuelle | Remplacer membrane |
| | Joints du filtre en mauvaises conditions | Vérification visuelle | Remplacer joints du filtre |
| | Filtre déchiré | Vérification visuelle | Remplacer filtre |
| | Tubes-L en mauvaise condition | Vérification visuelle | Réparer/remplacer |
| | Tube-L caoutchouc en mauvais état | Vérification visuelle | Réparer/remplacer |
| | Mauvaise liaison entre compartiment inférieur, joint d'étanchéité, tubes et tête de membrane. | Vérifier la liaison et l'alignement Vérifier la liaison et l'alignement | Reconnecter ou remplacer les composants |

• Grille de diagnostic (3/3)

| SYMPTOME | DIAGNOSTIC | | CORRECTION NECESSAIRE |
|--|--|---|--|
| | DEFAILLANCE | A VERIFIER | |
| | Tête de membrane en mauvais état | Vérification visuelle | Remplacer tête de membrane |
| | Membrane en mauvais état | Vérification visuelle | Remplacer Membrane |
| | Mauvais attachement entre cadre, tête de membrane et kit aimant | Vérifier attachement et alignement | Rattacher/réparer/remplacer composant |
| | Couvercle du filtre cassé ou déformé | Vérifier l'intégralité du couvercle et les fuites | Réparer/Remplacer |
| | Boitier supérieur cassé ou déformé | Vérifier l'intégralité du couvercle et les fuites | Réparer/Remplacer |
| | Mauvais attachement du couvercle du filtre | Alignement et attachement | Rattacher ou réparer/remplacer composant |
| | Plateau central cassé ou déformé | Vérification visuelle | Réparer/Remplacer |
| | Joint d'étanchéité en mauvaise condition | Vérification visuelle. Vérification des fuites | Remplacer le joint |
| | Mauvais attachement compartiment inférieur, plateau central et joint | Alignement and attachement | Rattacher ou réparer/remplacer composant |
| | Boitier inférieur cassé ou déformé | Vérifier l'intégralité du composant et les fuites | Réparer/Remplacer |
| | | | |
| | Membrane cassé | Vérification visuelle | Remplacer membrane |
| | Absorbeur de son détérioré | Vérification visuelle | Remplacer absorbeur de son |
| | | | |
| COMPRESSEUR DEMARRE MAIS AVEC DES BRUITS ANORMAL | Dommage structurel dans le cadre | Régularité, condition du métal | Réparer/Remplacer cadre |
| | Mauvais attachement entre cadre, tête de membrane et kit aimant | Alignement et attachement | Rattacher ou réparer/remplacer composant |
| | Silentbloc détérioré | Vérification visuelle | Remplacer Silentblocs |

Annexe – chapitre 4 :**Annexe II. 1 :** Catégories de procédés de la FA dans la norme PR NF ISO 17296-2 (OBATON et al., 2015)

| Catégorie de procédés | Dénomination commerciale | Source d'activation | Matériau de base et forme | Mécanisme de liaison | Procédé de fabrication d'une couche | Post-traitement | Spécificités |
|--|---|--|---|-----------------------------------|--|--|--|
| Photopolymérisation en cuve (vat photopolymerization) | SLA, SL : Stéréolithographie apparatus (3D Systems, USA) | Laser (généralement UV) + miroir | Polymère liquide dans une cuve | Réaction chimique | Photopolymérisation sélective du matériau activée par la lumière | Nettoyage ; Ébarbage ; Nouvelle exposition aux UV. | Technologie la plus ancienne (1984) |
| | DLP : <i>Digital Light Processing</i> (Prodways, France) | Lampe (généralement UV) + photomasque | | | | | Nécessité de supports non solubles ; Mauvais vieillissement ; Niveau de détails élevé ; Bel état de surface ; Nécessité de recuit pour finaliser la polymérisation. |
| Projection de matière (material jetting) | Inkjet PJ : <i>polyjet</i> (Stratasys, Israël) <i>Multijet printing</i> (3D systems, USA) | Rayonnement lumineux | Goutte de polymère liquide | Réaction chimique | Dépôt sélectif du matériau | Ébarbage* ; Nouvelle exposition aux UV. | Fabrication bi-matière ; Niveau de détails élevé ; Pièces fonctionnelles (Réalisation de pièces élastiques) ; Bonne répétabilité ; |
| | MJM : Modelage à Jets Multiples Multi-Matériaux (3D Systems, USA) M ³ D : <i>Maskless Mesoscale Materials Deposition</i> (Optomec, USA) | | Goutte de cire fondue | Solidification | | | Supports en gel hydrosoluble ; Etat de surface moyen ; Mauvais vieillissement ; Mauvaise résistance aux hautes températures. |
| Projection de liant (binder jetting) | 3DP ^{PM} (Z Corp racheté par 3D Systems, USA) céramique S-Max ^{PM} (ExOne, USA) | Agent de liaison | Poudre (métallique, plastique, céramique) | Réaction chimique et/ou thermique | Dépôt sélectif de liant liquide sur le matériau | Suppression de la poudre excédentaire. | Pièces multicolores ; Pas de supports ; Bas coût ; Rapide ; Pas adaptée pour des pièces fonctionnelles (pièces fragiles) ; Adaptée pour les prototypes visuels. |
| Extrusion de matière (material extrusion) | FDM : <i>Fused Deposition Modelling</i> (Stratasys, Israël) Technologie de dépose de fil fondu | Chaleur, ultrasons ou réaction chimique entre les composants | Filament de thermoplastiques ou de céramiques structurelles | Réaction chimique ou thermique | Extrusion sélective du matériau à travers une buse chauffée | Ébarbage* | Technologie la moins onéreuse ; Pièces poly-couleurs (sans mélange) ; Réalisation de pièces fonctionnelles (sans fortes contraintes) ; Nécessité de supports solubles ; Mauvais état de surface ; Niveau de détails grossier. |

Annexes

| Catégorie de procédés | Dénomination commerciale | Source d'activation | Matériau de base et forme | Mécanisme de liaison | Procédé de fabrication d'une couche | Post-traitement | Spécificités |
|--|--|----------------------------|--|---|--|--|---|
| Fusion sur lit de poudre (<i>Powder Bed Fusion, PBD</i>) | FSL : Frittage Sélectif par Laser SLS : <i>Selective Laser Sintering</i> (EOS, Allemagne) [14] SLM : <i>Selective Laser Melting</i> (EOS, Allemagne) [31, 32] LS : <i>laser Sintering</i> | Laser + miroir | Poudre (plastique, céramique) | Réaction thermique | Fusion sélective du matériau | Suppression de la poudre excédentaire ; Ébarbage pour les poudres métalliques ; Amélioration de l'état de surface. | Pièces rigides ; Très faible ductilité ; Plus grand choix de matériaux ; Supports uniquement pour les poudres métalliques ; Nécessité d'un post-traitement pour améliorer l'état de surface (forte rugosité). |
| | DMLS : <i>Direct Metal Laser Sintering</i> [33] | Poudre (métallique) | | | | | |
| | EBM : <i>Electron Beam Melting</i> (Arcam, Suède) [34-36] EBF : <i>electron beam freeform</i> | Canon à électrons focalisé | Poudre (métallique) | | | | |
| | SMS : <i>Selective Mask Sintering</i> (Sintermask Technologies, Suède) | Lampe IR + masque | Poudre (plastique) | | | | Grande surface d'impression ; Plus rapide que SLS ; Encrassement rapide du masque. |
| Dépôt de matière sous énergie concentrée (<i>Directed Energy Deposition, DED</i>) | CLAD : Construction Laser Additive Directe (BeAM, France) LMD : <i>Laser Metal Deposition</i> LDT : <i>Laser Deposition Technology</i> BPLAM : <i>Blown Powder Laser Additive Manufacturing</i> LENS : <i>Laser-Engineered Net Shaping</i> [38] (Optomec, USA) DMD : <i>Direct Metal Deposition</i> | Laser | Filament ou poudre (métallique) | Réaction thermique | Dépôt sélectif du matériau à travers une buse chauffée | Amélioration de l'état de surface | |
| | | Canon à électrons focalisé | | | | | |
| | | Arc plasma transféré | | | | | |
| Stratification de couches (<i>sheet lamination</i>) | UAM : <i>Ultrasonic Additive Manufacturing</i> | Par rouleau continu | Feuille (papier, bois, polymère, métal ou composite) | Soudage par ultrason (métal) | Découpage sélectif du matériau | Suppression des déchets | Pas de support ; Procédé peu onéreux. |
| | LOM : <i>Laminated Object Manufacturing</i> (Cubic technologies, USA) stratoconception (Cirtes, France) Pack & strat (Cirtes, France) | Par rouleau discontinu | | Adhésif (papier, bois, polymère, composite) | | | |

Annexes

Annexe II. 2 : Caractéristiques de la machine ZORTRAX M200 plus

| Device | |
|-------------------------|--|
| Build volume | 200 x 200 x 180 mm (7.9 x 7.9 x 7.1 in) |
| Material container | Spool |
| Material diameter | 1.75 mm (0.069 in) |
| Nozzle diameter | 0.3 mm (0.012 in), 0.4 mm (0.016 in), 0.6 mm (0.024 in) |
| Support | Mechanically removed - printed with the same material as the model |
| Extruder | Single (compatible with demanding materials like TPU or nylon) |
| Extruder cooling system | Radial fan cooling the extruder block; two fans cooling the print |
| Hotend | Single, V3 |
| Platform | Heated; perforated and glass are applicable |
| Material endstop | Mechanical |
| Connectivity | Wi-Fi, Ethernet, USB |
| Operating system | Android |
| Touchscreen | 4" IPS 800x480 |
| Camera | Yes |
| External materials | Applicable |

| Device | |
|--------------|---|
| Build volume | 200 x 200 x 180 mm (7.9 x 7.9 x 7.1 in) |

| Printing | |
|------------------------|--|
| Technology | LPD (Layer Plastic Deposition) – depositing melted material layer by layer onto the build platform |
| Layer resolution | 90-390 microns (for 0.4 mm nozzle) |
| Minimal wall thickness | 450 microns (for 0.4 mm nozzle) |
| Platform levelling | Automatic measurement of platform points' height |

| Temperature | |
|---|---------------------|
| Maximum printing temperature (extruder) | 290° C (554° F) |
| Maximum platform temperature | 105° C (221° F) |
| Ambient operation temperature | 20-30° C (68-86° F) |
| Storage temperature | 0-35° C (32-95° F) |

| Temperature |
|-------------|
|-------------|

Annexe II. 3 : Les propriétés du PC-ABS fournies par Silex

| PC-ABS properties | | |
|--|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Physical Properties | Value | Comments |
| Density | 1,14 g/cm ³ | ISO 1183 |
| Moisture absorption | 0,1% | 23°C ISO 62 |
| Mold Shrinkage, flow | 0.5 – 0.7% | 3,2mm (0.125 inch) SABIC Method |
| Melt Flow Rate | 8.5 g/10 min | ASTM D1238 |
| Mechanical Properties | | |
| Tensile Strength at Yield | 58 MPa, Thickness 3,20 mm | 50mm/min (2 inch/min); ASTM D638 |
| Tensile Strength at Break | 57 MPa, Thickness 3,20 mm | 50mm/min (2 inch/min); ASTM D638 |
| Tensile modulus | 2.21 GPa | 1mm/min ASTM D790 |
| Elongation at Yield | 4.9 % | 50mm/min (2 inch/min); ASTM D638 |
| Elongation at Break | 125 %, Thickness 3,20 mm | 50mm/min (2 inch/min); ASTM D638 |
| Flexural Strength | 86 MPa, Thickness 3,20 mm | 1.27mm/min (0.05 inch/min); ASTM D790 |
| Flexural Modulus | 2.39 GPa, Thickness 3,20 mm | 1.27mm/min (0.05 inch/min); ASTM D790 |
| Tensile Strength at Yield | 50 MPa, Thickness 3,20 mm | 50mm/min (2 inch/min); ISO 527 |
| Tensile Strength at Break | 45 MPa, Thickness 3,20 mm | 50mm/min (2 inch/min); ISO 527 |
| Tensile modulus | 2.25 GPa | 1mm/min ISO 527 |
| Rockwell Hardness | 108 | ASTM D785 |
| Izod Impact, Notched | 54 J/cm, Thickness 3.20 mm, -30.0 | ASTM D256 |
| Thermal Properties | | |
| Melting point (T_M) | 225°C | ASTM D3418 |
| Glass transition temperature ($T - G$) | 125°C | ASTM D1525 |
| Vicat Softening Temperature | 118°C | B/50 ISO 306 |
| Heat Distortion Temperature | 124°C | 0.45 MPa, 3,2 mm unannealed ASTM D648 |
| Thermal Expansion Coefficient (CTE) | 7.2E – 051/°C | -40°C to 40°C, flow ISO 11359-2 |

Annexe II. 4 : Paramètres de fabrication des prototypes

- Les paramètres de fabrication du prototype 1 :

| Paramètres | Valeur |
|------------------------|----------------|
| Matériau | PC-ABS |
| Masse de matériau | 26 g |
| Diamètre de buse | 0.4 mm |
| Epaisseur de la couche | 0.19 mm |
| Qualité | Normale |
| Raft | Désactivé |
| Remplissage (Infill) | Solide (100%) |
| Orientation | 0° inclinaison |

- Les paramètres de fabrication du prototype 2 :

| Paramètres | Valeur |
|------------------------|----------------|
| Matériau | PC-ABS |
| Masse de matériau | 31g |
| Diamètre de buse | 0.4 mm |
| Epaisseur de la couche | 0.19 mm |
| Qualité | Normale |
| Raft | Désactivé |
| Remplissage (Infill) | Solide (100%) |
| Orientation | 0° inclinaison |

- Les paramètres de fabrication du prototype 3 :

| Paramètres | Valeur |
|------------------------|----------------|
| Matériau | PC-ABS |
| Masse de matériau | 31g |
| Diamètre de buse | 0.4 mm |
| Epaisseur de la couche | 0.19 mm |
| Qualité | Normale |
| Raft | Désactivé |
| Remplissage (Infill) | Solide (100%) |
| Orientation | 0° inclinaison |

- Les paramètres de fabrication du prototype 4 :

| Paramètres | Valeur |
|-------------------------------|----------------|
| Matériau | PC-ABS |
| Masse de matériau | 33g |
| Diamètre de buse | 0.4 mm |
| Epaisseur de la couche | 0.29 mm |
| Qualité | Normale |
| Raft | Désactivé |
| Remplissage (Infill) | Solide (100%) |
| Orientation | 0° inclinaison |

Annexe - chapitre 5

Annexe III. 1 : Valeurs absolues des impacts de dommages par cycle de vie d'un compresseur neuf.

| Catégories de dommages | Unité | Production | Transport | Utilisation | Fin de vie | Total |
|-------------------------|------------------------|------------|-----------|-------------|---------------|------------|
| Santé humaine | Daly | 0.000539 | 0.000019 | 0.000208 | - 2.65E-06 | 0.00075275 |
| Qualité de l'écosystème | PDF*m ² *yr | 118 | 4.8 | 114 | 0.0159 | 236.8795 |
| Changement climatique | Kg CO2 éq | 447 | 17.6 | 200 | -0.319 | 663.005 |
| Ressources | MJ primary | 6660 | 281 | 21900 | -23.6 | 28723 |

Annexe III. 2 : Comparaison des catégories d'impacts entre le compresseur neuf et le remanufacturé.

| Catégories d'impacts | Unité | Compresseur neuf | Compresseur remanufacturé |
|-----------------------------------|--------------|------------------|---------------------------|
| Eco-toxicité aquatique | Kg TEG water | 124 200 | 106 400 |
| Acidification du milieu aquatique | Kg SO2 éq | 4.66 | 3.28 |
| Eutrophisation | Kg PO4 P-lim | 0.249 | 0.19 |
| Réchauffement climatique | Kg CO2 éq | 664 | 486 |
| Energie non-renouvelable | MJ primary | 28 600 | 26 000 |
| Extraction de minéraux | MJ surplus | 183 | 124.8 |